



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Volumen I
Memoria – Cálculos – Resultados – Presupuesto - Chapas

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

DISEÑO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

TFG presentado para optar al título de GRADO en INGENIERÍA ELÉCTRICA
por **Andrés Alonso Martín**

Barcelona, 11 de Junio de 2014

Tutor proyecto: Ramón Bargalló Perpiñà
Departamento de Ingeniería Eléctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA

ANEXO 1: CÁLCULO MOTOR 0,37KW

ANEXO 2: RESUMEN RESULTADOS

ANEXO 3: PRESUPUESTO

ANEXO 4: CHAPAS Y CARCASA




Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Memoria

DISEÑO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

TFG presentado para optar al título de GRADO en INGENIERÍA ELÉCTRICA
por **Andrés Alonso Martín**

Barcelona, 11 de Junio de 2014

Director: Ramón Bargalló Perpiñà
Departamento de Ingeniería Eléctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE MEMORIA

RESUM

El següent projecte té com objectiu principal el disseny d'un motor d'inducció monofàsic d'engegada per condensador, sense aplicació específica. El motor és dissenyat a partir de la potència, la velocitat de sincronisme i la freqüència. Aquestes dades són subministrades pel fabricant.

Es crea una pauta de càlculs analítics mitjançant el programa *Mathcad* per trobar les dimensions del motor i les seves característiques nominals.

Posteriorment es realitzen les anàlisis magnètiques mitjançant un programa basat en Elements Finits (*FEMM*) per a corroborar que el funcionament és l'adequat.

Finalment es realitza un anàlisi tèrmic per a trobar el sistema de ventilació necessari per aquest motor.

El projecte està format per una memòria teòrica, una pauta analítica aplicada al motor dissenyat, simulacions mitjançant elements finits, pressupost i les dimensions de la xapa seleccionada.

RESUMEN

El siguiente proyecto tiene como objetivo principal el diseño de un motor de inducción monofásico de arrancada por condensador, sin aplicación específica. El motor es diseñado a partir de la potencia, la velocidad de sincronismo y la frecuencia. Estos datos son suministrados por el fabricante.

Se crea una pauta de cálculos analíticos mediante el programa *Mathcad* para encontrar las dimensiones del motor y sus características nominales.

Posteriormente se realizan los análisis magnéticos mediante un programa basado en los Elementos Finitos (FEMM) para corroborar que el funcionamiento es el adecuado.

Finalmente se realiza un análisis térmico para encontrar el sistema de ventilación necesario para este motor.

El proyecto está formado por una memoria teórica, una pauta analítica aplicada al motor diseñado, simulaciones mediante elementos finitos, presupuesto y las dimensiones de la chapa seleccionada.

ABSTRACT

The main objective of this project is the design of a single phase induction motor with a capacitor start without specific application. The engine is designed taking into account the power, the synchronous speed and the frequency. This data is supplied by the manufacturer.

The analytical calculation pattern is created using the Mathcad program in order to find the dimensions of the engine and its nominal characteristics.

Subsequently, the magnetic analyses are performed using a model based on the Finite Elements (FEMM) to verify that the operation is right.

Finally, a thermal analysis is performed to find the needed ventilation system for the engine.

The project consists of a theoretical report, an analytical model applied to the motor designed, finite element simulations, the budget and the size of the selected metal sheet

OBJETIVOS

Diseño de un motor de inducción monofásico de arrancada por condensador a partir de la potencia, velocidad y frecuencia.

Realizar una pauta de cálculo analítico mediante *Matchcad* para encontrar las dimensiones y las características del motor.

Realizar una pauta mediante *Excel* para encontrar el devanado necesario para el motor.

Análisis magnéticos y térmicos mediante un programa de elementos finitos (*Finite Element Method Magnetic*) para verificar el buen funcionamiento del motor y su ventilación.

Utilización del lenguaje LUA para automatizar procesos.

Conseguir un motor con un par de arranque superior al 300 por ciento del par nominal.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor del TFG, Dr. Ramón Bargalló Perpiñà, por su constante atención y ayuda durante el transcurso del TFG, y por solucionarme todas las dudas que han ido apareciendo.

A la empresa en la que trabajo, Smartel, por facilitarme un espacio y material para realizar el TFG.

A la familia, por el apoyo que siempre he recibido durante mis estudios.

Muchas gracias.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El motor eléctrico es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Están compuestos por un estator y un rotor. Normalmente en el estator se dispone el devanado principal inductor y en el rotor el devanado o barras inducidas.

1.1. Tipos de motores de inducción monofásicos

1.1.1. Motor de fase partida

El motor de fase partida es uno de los tipos de motores monofásicos más antiguos construidos para fines comerciales.

Un motor de fase partida es un motor de inducción monofásico que tiene un devanado principal y otro devanado auxiliar (de arranque), estando los dos devanados desplazados lo más posible a 90 grados eléctricos. El devanado de arranque tiene una relación de R a X más alta que la del devanado principal, para obtener el efecto de fase partida, separándolo del circuito un interruptor centrífugo que desconectará el devanado de arranque después que el motor haya alcanzado una determinada velocidad. Este motor está construido en jaula de ardilla.

El devanado principal y el devanado de arranque están colocados en el estator. Usualmente el devanado principal tiene un hilo de mayor de sección y menos espiras que el devanado de arranque.

Para el arranque, ambos devanados, principal y de arranque, están conectados en paralelo sobre la línea de alimentación. En serie con el devanado de arranque

está el interruptor de arranque, el cual interrumpe el circuito cuando se alcanza, aproximadamente, una velocidad de 75% al 100% de la de sincronismo. Este interruptor, usualmente es accionado mediante sistemas centrífugos.

Como antes se ha explicado durante el momento de arranque ambos devanados deben estar conectados para dar lugar a la formación del par. Pero cuando el motor alcanza la velocidad de sincronismo, el devanado principal solo, puede desarrollar un par casi igual al producido por los dos devanados combinados.

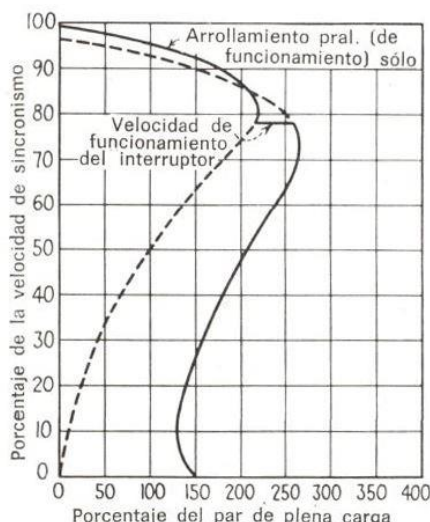


Figura 1. *Curva par-velocidad de un motor de fase partida nominal*

A una velocidad superior, entre 80 y 90 por 100 de la de sincronismo, la curva de par-devanados conectados cruza la curva de par-devanado principal, de tal manera que, a velocidades por encima de este punto, el motor desarrolla un par menor, si el devanado de arranque está conectado en el circuito que si no lo está. Sería ideal que el interruptor centrífugo desconectase el circuito en este punto. Sin embargo, este punto no tiene lugar siempre bajo una misma velocidad por lo que la práctica usual es hacer que como promedio el interruptor actúe bajo una velocidad ligeramente por debajo de la media del punto de superposición de las curvas.

Este interruptor es necesario también ya que evita que el motor absorba de la línea una cantidad excesiva de potencia y se queme el devanado de arranque, lo que ocurriría si se dejara en el circuito de manera continua.

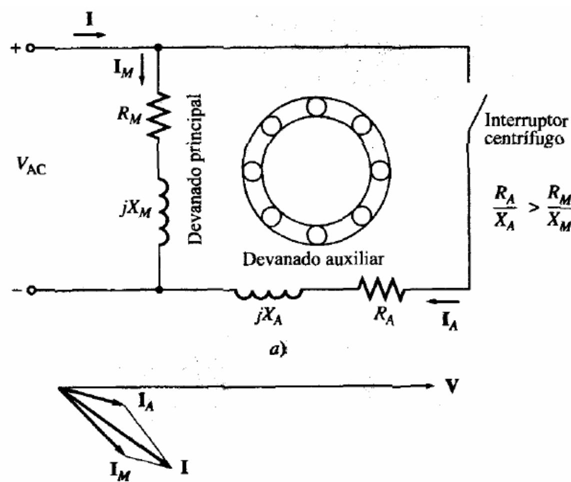


Figura 2. *Motor de fase partida. Esquema eléctrico y desfase de corrientes*

1.1.2. Motores con arranque por condensador

Estos motores son utilizados para todas aquellas aplicaciones y usos generales propios de un servicio duro en que se requieren pares de arranque y de funcionamiento importantes.

Existen tres variedades de motor con condensador, cada una de las cuales con su conjunto particular de características:

a) Motor con arranque por condensador. Un motor con arranque por condensador es un motor en el que se hace uso del devanado de arranque y del condensador solamente durante el arranque.
b) Motor de condensador permanente. Un motor con condensador permanente hace uso del devanado de arranque y del condensador continuamente, sin cambio alguno en la capacidad.
c) Motor con condensador doble. Un motor con condensador doble es un motor que hace uso de un valor de capacidad para el arranque y de otro diferente valor para las condiciones de trabajo; este motor utiliza dos valores diferentes de capacidad.

Motor de arranque por condensador. Los pares de los motores con arranque por condensador son, generalmente, más altos que los pares correspondientes a los motores de fase partida.

Como en el caso de un motor de fase partida, el devanado principal es el más voluminoso de los dos.

En un motor de arranque por condensador, éste hace que la corriente de la fase de arranque adelante a la tensión de la fase principal, lo que permite obtener un importante ángulo de desfase entre las corrientes de los dos devanados. Este motor desarrolla un par de arranque más de dos veces superior al de un motor de fase partida. Se ve así, que un condensador constituye un dispositivo de arranque mucho más efectivo que una resistencia.

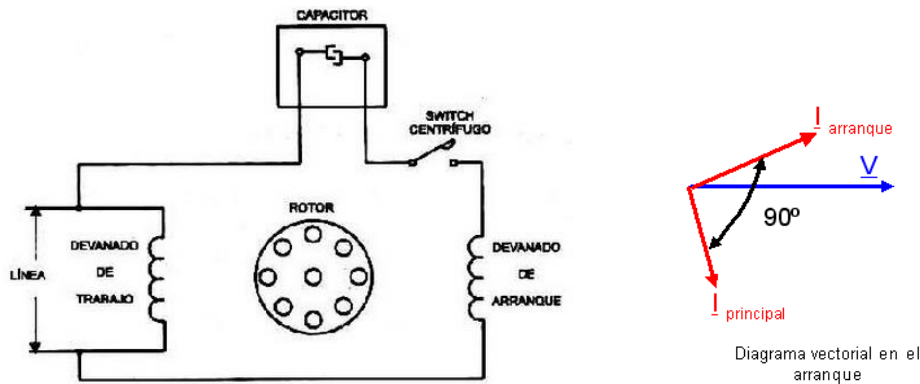


Figura 3. *Motor de arranque por condensador. Esquema eléctrico y desfase de corrientes*

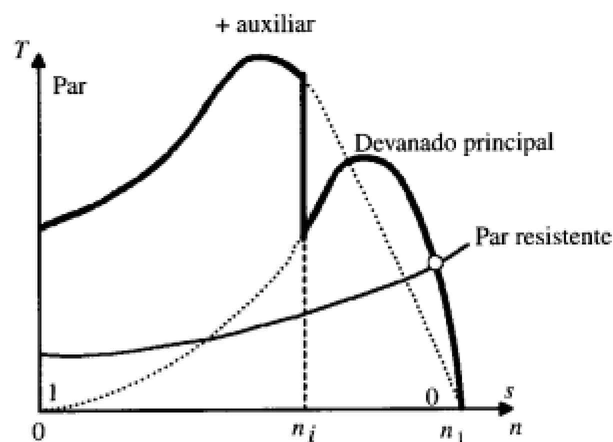


Figura 4. *Motor de arranque por condensador. Curva par-velocidad*

Motor con condensador doble. El motor con condensador doble es un tipo de motor con condensador que arranca con cierto valor de capacidad en serie con el devanado de arranque, y que funciona con otra capacidad de diferente valor una vez arrancado. Este cambio de valor de capacidad es automático. El motor con condensador doble tiene elevados pares de arranque y de trabajo.

La disposición de los devanados y del interruptor en este motor es idéntica a la usada en un motor con arranque por condensador. La diferencia entre estos dos motores consiste en que el motor con condensador doble tiene un condensador de trabajo constantemente montado en serie con el devanado de arranque; estando el condensado de arranque en paralelo con el de trabajo. El condensador de trabajo habitualmente es del tipo de papel en aceite, previsto para una tensión en corriente alterna de 370 voltios en servicio continuo.

La adición de este condensador tiene por efecto:

1. Aumentar el par máximo de 5 a 30 por ciento;
2. Mejorar el rendimiento y el factor de potencia a plena carga;
3. Reducir el ruido en el funcionamiento a plena carga;
4. Aumentar el par de arranque de 5 a 20 por 100

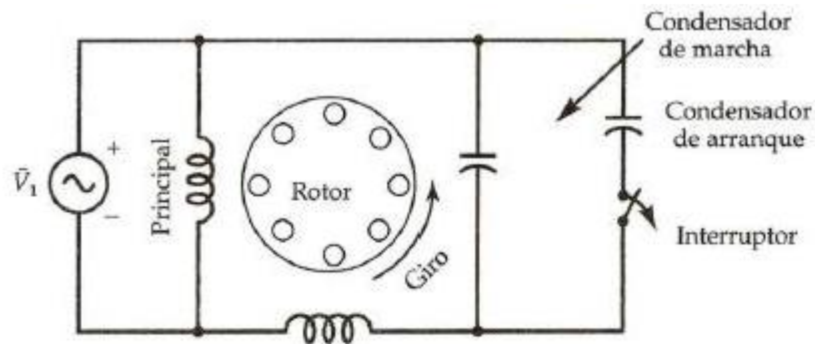


Figura 5. *Motor con condensador doble. Esquema eléctrico*

Motor con condensador permanente. El efecto del condensador de trabajo es mejorar el rendimiento. El condensador permanente aumenta el par máximo, el rendimiento y el factor de potencia, a la vez que reduce el ruido. Son generalmente empleados para aplicaciones especiales tales como ventiladores y sopladores montados directamente sobre el árbol y servomotores. Tienen la importante ventaja de no requerir interruptor de arranque. En términos generales, no son convenientes para aplicaciones accionadas mediante correas o cualquier otra aplicación de servicio continuo que requieran un par de arranque importante.

Al trabajar de forma continua como motor de arranque por capacitor no necesita interruptor centrífugo.

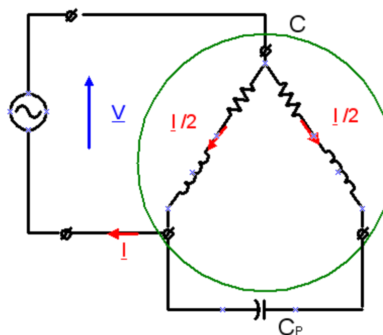


Figura 6. *Motor con condensador permanente. Esquema eléctrico*

1.2. Partes de un motor de inducción monofásico

Las partes básicas de un motor de inducción monofásico son el estator y el rotor. Estas dos partes están separadas por un espacio de aire llamado entrehierro.

1.2.1. Estator

Constituye la parte mecánicamente fija del motor. En él se encuentra el sistema inductor. Está formado por el devanado principal (inductor), el núcleo magnético, la carcasa, el aislamiento y la caja de conexiones.

a) Devanado principal (inductor): al tratarse de un motor de inducción monofásico está formado por dos devanados de cobre, uno para el devanado principal y el otro para el devanado de arranque. Su distribución en el núcleo magnético depende del número de ranuras del estator y del número de polos. El número de espiras de cada bobina es fijado según las características de la máquina, a su vez para diseñar el devanado se tiene en cuenta el número de conductores y su sección. Todos los conductores son recubiertos por una capa de aislante para evitar el contacto eléctrico entre hilos.

Por motivos de construcción la división entre el área ocupada por los conductores y el área de la ranura no puede superar el 0,4.

A diferencia de un motor trifásico, en un motor monofásico el devanado principal, al ser conectado, no crea un campo magnético giratorio sino uno pulsante, es por eso que se necesita el devanado de arranque.

b) Núcleo magnético: consiste en un número de chapas magnéticas apiladas. Estas chapas tienen forma de corona y con ranuras para poder introducirles el devanado necesario.

Para la selección de una chapa es necesario tener en cuenta el diámetro interior y exterior, la forma, la medida de las ranuras y la profundidad del empilado

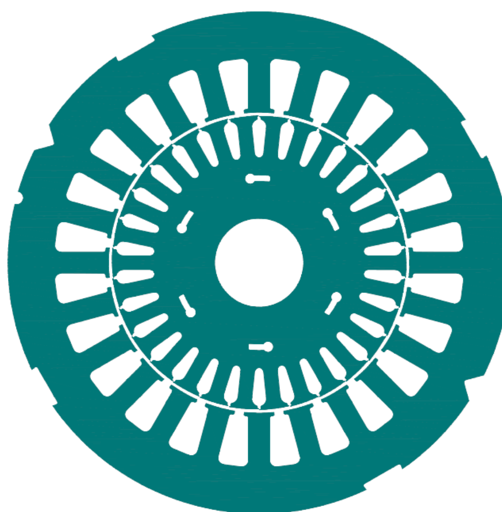


Figura 7. *Chapa de un estator y un rotor*



Figura 8. *Empilado de un estator*

c) Carcasa: es una estructura, normalmente de aluminio, la cual aísla y sostiene el motor y tiene un papel muy importante para ayudar a la disipación de calor del mismo. Normalmente suelen ser con aletas para así ampliar la superficie de ventilación y mejorar la disipación de calor del motor.

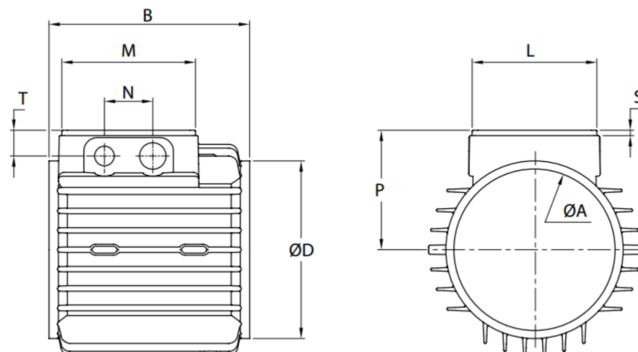


Figura 9. *Esquema carcasa de un motor eléctrico*

d) Aislamiento: es necesario para evitar el contacto eléctrico entre el núcleo magnético y los conductores.

e) Caja de conexiones: parte del motor donde se encuentran los bornes de los devanados del estator para ser conectados a la línea, en el caso de los motores monofásicos se conectan directamente a la línea de 230V.

1.2.2. Rotor

Parte móvil del motor, normalmente es la parte interior del motor todo y que puede ser la exterior, que es inducida por el sistema inductor. Está formado por el núcleo magnético, barras conductoras, anillo i eje. También si fuera necesario se añadiría un ventilador acoplado al eje para ayudar a disipar el calor del motor proveniente de las pérdidas.

a) Núcleo magnético: está compuesto, como el estator, por un conjunto de chapas magnéticas con ranuras. En estas ranuras se les inyecta generalmente aluminio, pero también algunos de sus derivados como podría ser el Silumin (87% Al + 13% Si). Su diámetro es un poco más pequeño que el diámetro interior del estator (dependerá del ancho del entrehierro).

b) Barras conductoras: estas barras van inyectadas en las ranuras del rotor, usualmente de aluminio, algún derivado o de algún otro material conductor, cuyas barras serán inducidas por el campo inductor que forma el devanado principal del estator.

c) Anillo: encargado de conectar todas las barras conductoras del rotor por un mismo extremo, poniendo de esta manera en cortocircuito todas las barras.

d) Eje: usualmente de acero inoxidable, gira con el rotor y lo sostiene mediante cojinetes fijados a la carcasa. En algunos casos también se puede encontrar fijado el ventilador del motor.

e) Ventilador: se añade un ventilador al eje si es necesario para la evacuación de calor de la máquina generada por las pérdidas.

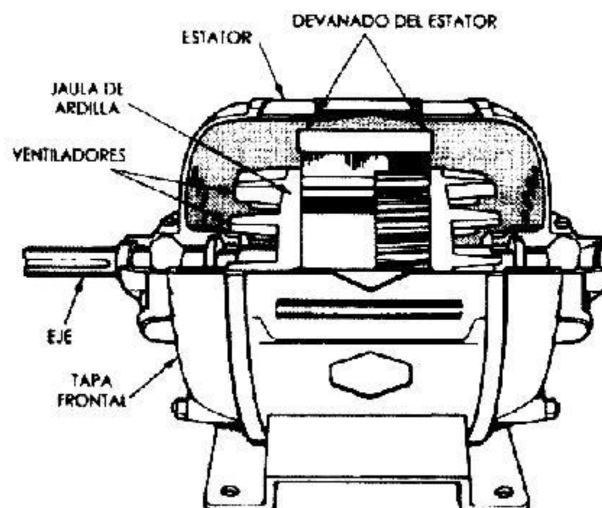


Figura 10. *Esquema carcasa de un motor eléctrico*

1.3. Ventajas del motor de inducción monofásico y sus aplicaciones

Su principal ventaja es la de ser un motor pequeño y poderse alimentar directamente a 230V. El hecho que puedan alimentarse a 230V es muy importante ya que hay muchas instalaciones, tanto industriales como residenciales a las que la compañía eléctrica solo suministra un servicio de CA monofásico.

Aplicaciones:

a) Motores para herramientas (taladros, pulidoras, etc.).

b) Aparatos domésticos (lavadoras, lavavajillas, ventiladores, etc.).

c) Maquinaria agrícola (donde no llega suministro trifásico).

d) Aires acondicionados.

e) Bombas de agua.

f) Locomotoras eléctricas.

1.4. Alimentación

Estos motores son alimentados directamente desde la línea de 230V en CA.

CAPÍTULO 2: CÁLCULO ANALÍTICO

Para el diseño de cualquier máquina eléctrica es necesario realizar un estudio analítico previo para determinar sus dimensiones y características de funcionamiento.

2.1. Datos iniciales

Se necesitan unos datos iniciales de los cuales se parte para realizar el cálculo del motor.

2.1.1. Potencia, tensión de línea y frecuencia

Valores totalmente necesarios para definir las dimensiones del motor:

- Potencia, P (W)
- Tensión de línea, V (V)
- Frecuencia, f (Hz)

2.1.2. Velocidad síncrona, polos y par nominal

Sabiendo la velocidad síncrona a la cual va a trabajar el motor, se puede encontrar el número de polos de la máquina.

Velocidad de sincronismo:

$$n_s = \frac{n_{syn}}{60} \quad (1)$$

Donde,

n_{syn}: velocidad de sincronismo [r.p.m]
n_s : velocidad de sincronismo [r.p.s]

Polos:

$$p = 2 \cdot \left(\frac{f}{n_s}\right) \quad (2)$$

Donde,

p: polos

f: frecuencia [Hz]

n_s : velocidad de sincronismo [r.p.s]

Par nominal:

$$T = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{n_{syn}}{60}\right)} \quad (3)$$

Donde,

T: par nominal [Nm]

P: potencia [W]

n_{syn}: velocidad de sincronismo [r.p.m]

2.1.3. Rendimiento

Actualmente la norma internacional a la que se refiere es la IEC 60034-30.

Esta norma es aplicable en motores monofásicos, trifásicos, de inducción de jaula de ardilla para 2, 4 o 6 polos en un rango de potencia nominal de salida desde 0,75 a 375kW. A día de hoy se clasifican en tres clases: IE1 (standard), IE2 (high) y IE3 (Premium), se prevé que en el año 2014 aparezca la nueva IE4.

En la Comunidad Europea la clase IE2 es obligatoria en todos los motores desde el 16 de Junio de 2011. La clase IE3 será obligatoria del 1 de enero de 2015 (7,5 a 375 kW) y a partir del 1 de Enero de 2017 la clase IE3 será obligatoria para motores de entre 0,75 a 375kW.

Posteriormente se diseñará un motor de 0,37kW por lo cual no será obligatorio que cumpla con la normativa vigente.

2.2. Dimensionado de la máquina

El primer cálculo a realizar en este proyecto es el estudio analítico sobre el motor de inducción monofásico, donde se determinan las dimensiones generales del motor, se escoge el estator y el rotor, se determinan los devanados y las características del motor.

2.2.1. Diámetro y longitud

Se busca el diámetro interior del estator y la longitud.

El diámetro necesario se encuentra con la siguiente expresión:

$$D^2L = \frac{\frac{P \cdot 9.55}{n_{syn}}}{\frac{4}{\pi}TRV} \quad (4)$$

Donde,

D^2L: constante volumétrica

D: diámetro interior estator [m]
L: longitud de la máquina [m]
n_{syn}: velocidad de sincronismo [r.p.m]
TRV: Torque per unit Rotor Volume [kNm/m^3]

Tabla 1. *Valores típicos para TRV*

Class of machine	TRV kNm/m^3
Small totally-enclosed motors (Ferrite magnets)	7 - 14
Totally-enclosed motors (sintered Rare Earth or NdFeB magnets)	14 - 42
Totally-enclosed motors (Bonded NdFeB magnets)	20
Integral-hp industrial motors	7 - 30
High-performance servomotors	15 - 50
Aerospace machines	30 - 75
Large liquid-cooled machines (e.g. turbine-generators)	100 - 250

A su vez se encuentra la longitud:

$$L = \frac{\pi \cdot D}{p} \tag{5}$$

Donde,
D: diámetro interior estator [m]
L: longitud de la máquina [m]
p: polos

Por lo tanto se puede aislar el diámetro de la siguiente manera:

$$D^2L = \frac{\pi \cdot D^3}{P} \rightarrow D^3 = D^2L \cdot \left(\frac{P}{\pi}\right) \tag{6}$$

$$D = \sqrt[3]{D^2L \cdot \left(\frac{P}{\pi}\right)} \tag{7}$$

El valor obtenido se redondea al diámetro interno de chapa del estator más próximo al que el fabricante pueda ofrecer.

Entonces, la longitud es:

$$L = \frac{D^2L}{D^2} \tag{8}$$

D^2L: constante volumétrica
D: diámetro interior estator [m]

La máquina está formada por chapas empiladas una detrás de otra hasta llegar a la longitud deseada, pero se estima que en el proceso de empilar un 0,05% será aire que quedará entre chapa y chapa. De esta manera encontramos la parte de hierro por la que está compuesta la longitud del motor. Con esto conseguiremos la longitud neta del hierro:

$$L_i = 0.95 \cdot L \tag{9}$$

Una vez se ha escogido la chapa normalizada por el fabricante podemos encontrar el paso polar y el paso por ranura en el estator.

El paso polar es la distancia que existe entre los ejes de dos polos consecutivos.

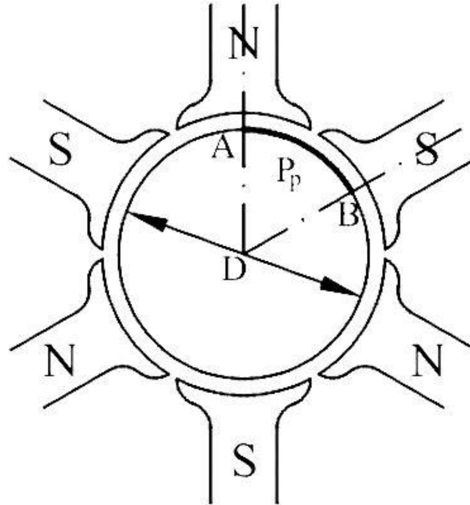


Figura 11. *Determinación del paso polar*

Entonces se sabe que,

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{p} \tag{10}$$

A su vez se sabe que el paso de ranura en el estator es el número de ranuras que contiene un polo.

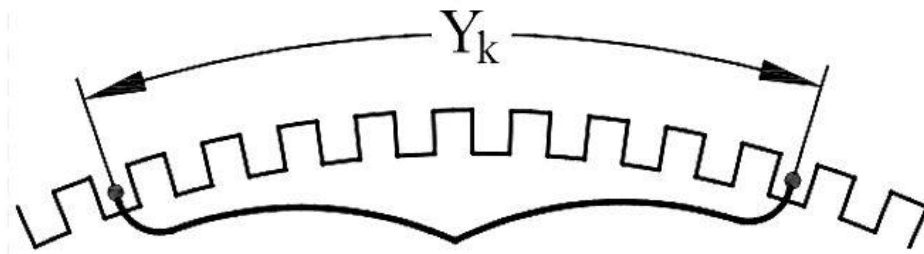


Figura 12. *Paso de ranura*

$$y_{ss} = \frac{\pi \cdot D}{S_s} \tag{11}$$

Donde,

y_{ss}: paso de ranura [m]
D: diámetro interior estator [m]
S_s: número de ranuras del estator

2.3. Flujos e inducciones

2.3.1. Flujos e inducciones en el estator

En el diseño de motores es básico calcular las inducciones para estimar la inducción que va a tener la máquina por tal de no saturarla, ya que si se satura será necesario aumentar el corriente para desarrollar la misma potencia.

El flujo por polo es:

$$\phi_m = B_{ts} \cdot \left(\frac{S_s}{p}\right) \cdot L_i \cdot W_{ts} \tag{12}$$

Donde,

ϕ_m: flujo por polo [Wb]
B_{ts}: inducción en los dientes del estator [T]
S_s : número de dientes en el estator
p: polos
L_i: longitud neta del hierro [mm]
W_{ts}: ancho de diente del estator [mm]

Entonces se verifica que la inducción en el núcleo del estator no es superior a 2.1T

$$d_{sc} = \frac{D_0 - D - 2d_{ss}}{2} \tag{13}$$

Dónde,

d_{sc}: profundidad del núcleo del estator [m]
D_0: diámetro exterior del estator [m]
D: diámetro interior del estator [m]
d_{ss}: profundidad de la ranura del estator [m]

Entonces,

$$B_{cs} = \frac{\phi_m}{2 \cdot L_i \cdot d_{cs}} \tag{14}$$

Dónde,

B_{cs}: inducción en el núcleo del estator [T]
ϕ_m: flujo por polo [Wb]
L_i: longitud neta del hierro [mm]
d_{sc}: profundidad del núcleo del estator [m]

2.3.2. Flujos e inducciones en el rotor

$$d_{sr} = \frac{D_r - D_{or} - 2d_{sr}}{2} \tag{15}$$

Donde,

d_{rc}: profundidad del núcleo del rotor [mm]
D_r: diámetro exterior del rotor [mm]
D_{or}: diámetro del eje del rotor [mm]
d_{sr}: profundidad de la ranura del rotor [mm]

$$B_{cr} = \frac{\Phi_m \cdot 1000}{2 \cdot L_i \cdot d_{rc}} \tag{16}$$

Donde,

B_{cr}: inducción en el núcleo del rotor [T]
ϕ_m: flujo por polo [Wb]
L_i: longitud neta del hierro [mm]
d_{sr}: profundidad del núcleo del rotor [mm]

Inducción en los dientes del rotor:

$$B_{tr} = \frac{\Phi_m}{\left(\frac{S_r}{p}\right) \cdot L_i \cdot W_{trr}} \tag{17}$$

Donde,

ϕ_m: flujo por polo [Wb]
B_{tr}: inducción en los dientes del rotor [T]
S_r : número de dientes en el estator
p: polos
L_i: longitud neta del hierro [m]
W_{trr}: ancho de diente del rotor [m]

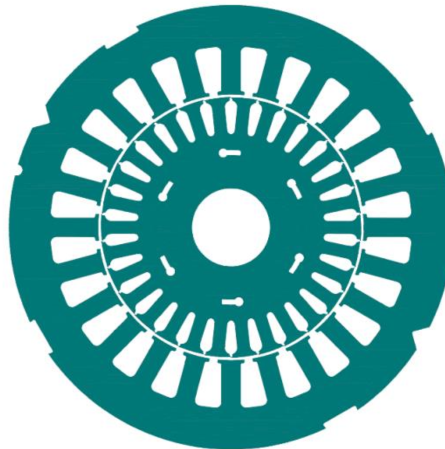


Figura 13. *Chapa estator y rotor*

2.4. Devanados del estator

2.4.1. Devanado principal

Los devanados del estator en motores de inducción monofásicos son de tipo concéntrico.

La disposición de los devanados se rige en gran medida por la necesidad de reducir al mínimo los flujos armónicos que de otro modo pueden dar lugar a ruido y par de aceleración desigual. Los armónicos se producen debido a la forma no sinusoidal de la onda magneto motriz y de la presencia de ranuras. Los armónicos debidos a las ondas se pueden reducir utilizando un 70 por ciento de las ranuras totales para el devanado principal aproximadamente. Las ranuras restantes (aproximadamente un 30 por ciento de las ranuras totales) se utilizan para colocar el devanado de arranque.

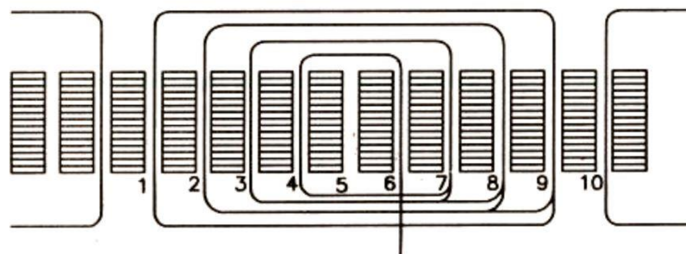


Figura 14. *Disposición del devanado concéntrico en un motor de 4 polos y una chapa de 36 ranuras*

En este caso se hará un ejemplo para calcular un devanado principal numéricamente.

El motor está compuesto de 36 ranuras y 4 polos.

$$Ranuras_{polo} = \frac{S_s}{p} \tag{18}$$

Por lo tanto,

$$Ranuras_{polo} = \frac{36}{4} = 9 \tag{19}$$

Las bobinas de extienden por las ranuras de la siguiente manera:

Bobina (1—9)	--	se expande 8 ranuras
Bobina (2—8)	--	se expande 6 ranuras
Bobina (3—7)	--	se expande 4 ranuras
Bobina (4—6)	--	se expande 2 ranuras

Una vez se sabe por dónde se extienden las bobinas se puede encontrar el número de vueltas necesarias en cada bobina por polo.

Bobina (4—6) – sin [(2/9) x 90º]=0.342
Bobina (3—7) – sin [(4/9) x 90º]=0.643
Bobina (2—8) – sin [(6/9) x 90º]=0.866
Bobina (1—9) – sin [(8/9) x 90º]=0.985

TOTAL= 2.836

Será necesario saber el tanto por ciento de vueltas por polo. Se encontrará de la siguiente manera utilizando los valores anteriores

Porcentaje vueltas por polo en bobina (4 -- 6)= (0.342/2.836) x 100 = 12.10 %
Porcentaje vueltas por polo en bobina (3 -- 7)= (0.643/2.836) x 100 = 22.70 %
Porcentaje vueltas por polo en bobina (2 -- 8)= (0.866/2.836) x 100 = 30.60 %
Porcentaje vueltas por polo en bobina (1 -- 9)= (0.985/2.836) x 100 = 34.60 %

TOTAL = 100.00 %

Finalmente se encuentra el factor de distribución del devanado principal.

El factor de distribución del devanado da información sobre el primer harmónico.

El factor de distribución se calcula de la siguiente manera:

$$k_W = \frac{\%(4-6)\cdot Turns(4-6) + \%(3-7)\cdot Turns(3-7) + (\%(2-8)\cdot Turns(2-8) + \%(1-9)\cdot Turns(1-9))}{Turns(4-6) + Turns(3-7) + (Turns(2-8) + Turns(1-9))} \qquad (20)$$

En este caso el factor de distribución (*K_{wm}*) es igual a 0,8 aproximadamente.

El factor de distribución del devanado es usualmente ente 0,75 y 0,85.

2.4.2. Número de vueltas en el devanado principal

El número de vueltas del devanado principal se calcula de la siguiente manera:

$$E = 0.95 \cdot V \qquad (21)$$

Donde,

E: voltaje inducido por el estator [V]
V: voltaje de la línea [V]

Se encuentra el número de vueltas en el devanado principal:

$$T_m = \frac{E}{4.44 \cdot f \cdot \phi_m \cdot K_{wm}} \qquad (22)$$

Donde,

T_m: número de vueltas en serie en el devanado principal
f: frecuencia [Hz]
ϕ_m: flujo por polo [Wb]
K_{wm}: factor de distribución del devanado principal

Entonces se puede encontrar el número de vueltas en serie por polo,

$$T_{pm} = \frac{T_m}{p} \tag{23}$$

Una vez se saben el número de vueltas por polo que deben existir en la máquina, se podrá encontrar el número de vueltas que le pertenecen a cada bobina según el tanto por ciento de cada bobina.

Número de vueltas por bobina (4 -- 6)= 12.10 % x T_{pm}
Número de vueltas por bobina (3 -- 7)= 22.70 % x T_{pm}
Número de vueltas por bobina (2 -- 8)= 30.60 % x T_{pm}
Número de vueltas por bobina (1 -- 9)= 34.60 % x T_{pm}

La longitud de una vuelta es:

$$L_{ml} = \frac{8.4\,(D+d_{ss})}{S_s} \cdot slots\ spanned + 2L \tag{24}$$

La longitud media del devanado principal es:

$$L_{mtm} = \frac{n^o vueltas \cdot Longitud(4-6) + n^o vueltas \cdot Longitud(3-7) + n^o vueltas \cdot Longitud(2-8) + n^o vueltas \cdot Longitud(1-9)}{TOTAL n^o Vueltas} \tag{25}$$

Donde,

L_{ml}: longitud de cada bobina [m]
D: diámetro interior estator [m]
d_{ss}: profundidad de la ranura del estator [m]
S_s: número de ranuras del estator.
L_{mtm}: longitud media del devanado principal [m]

2.4.3. Dimensiones de los conductores

Para el diseño del devanado es imprescindible haber escogido al menos una chapa apta para las características del estator. El devanado será el factor decisivo para determinar la chapa definitiva.

Primero de todo se encuentra la corriente nominal que se prevé que va a circular por el conductor basándonos en valores estimados sobre la práctica:

$$I = \frac{P}{V \cdot \eta \cdot cos\phi} \tag{26}$$

Donde,

I: intensidad nominal [A]
P: potencia [W]
V: voltaje [V]
η: rendimiento estimado
$cos\phi$: factor de potencia

Entonces se escoge una densidad de corriente que está comprendida entre 4 y 10A/mm^2.

$$a_{mo} = \frac{I}{\delta_m} \tag{27}$$

Donde,

a_{mo}: sección del hilo conductor [mm^2]
I: corriente nominal [A]
δ_m: densidad de corriente [A/mm^2]

Por lo tanto,

$$d_{11} = \sqrt{\frac{4 \cdot a_{mo}}{\pi}} \tag{28}$$

Se escoge el diámetro de la tabla normalizada de conductores más cercano al calculado (a poder ser superior al calculado, para no aumentar la densidad de corriente) y se vuelve a calcular la sección con el nuevo diámetro.

Tabla 2. *Hilos normalizados*

Diameter/ mm	Grade 1/mm		Grade 2/mm		Diameter/ mm	Grade 1/mm		Grade 2/mm	
Rated	Min. resin	Max. outer diameter	Min. resin	Max. outer diameter	Rated	Min. resin	Max. outer diameter	Min. resin	Max. outer diameter
0.200	0.014	0.226	0.027	0.239	1000	0.034	1062	0.063	1094
0.212	0.015	0.240	0.029	0.254	1060	0.034	1124	0.065	1157
0.224	0.015	0.252	0.029	0.266	1120	0.034	1184	0.065	1217
0.236	0.017	0.267	0.032	0.283	1180	0.035	1246	0.067	1279
0.250	0.017	0.281	0.032	0.297	1250	0.035	1316	0.067	1349
0.265	0.018	0.297	0.033	0.314	1320	0.036	1388	0.069	1422
0.280	0.018	0.312	0.033	0.329	1400	0.036	1468	0.069	1502
0.300	0.019	0.334	0.035	0.352	1500	0.038	1570	0.071	1606
0.315	0.019	0.349	0.035	0.367	1600	0.038	1670	0.071	1706
0.335	0.020	0.372	0.038	0.391	1700	0.039	1772	0.073	1809
0.355	0.020	0.392	0.038	0.411	1800	0.039	1872	0.073	1909
0.375	0.021	0.414	0.040	0.434	1900	0.040	1974	0.075	2012
0.400	0.021	0.439	0.040	0.459	2000	0.040	2074	0.075	2112
0.425	0.022	0.466	0.042	0.488	2120	0.041	2196	0.077	2235
0.450	0.022	0.491	0.042	0.513	2240	0.041	2316	0.077	2355
0.475	0.024	0.519	0.045	0.541	2360	0.042	2438	0.079	2478
0.500	0.024	0.544	0.045	0.566	2500	0.042	2578	0.079	2618
0.530	0.025	0.576	0.047	0.600	2650	0.043	2730	0.081	2772
0.560	0.025	0.606	0.047	0.630	2800	0.043	2880	0.081	2922
0.600	0.027	0.649	0.050	0.674	3000	0.045	3083	0.084	3126
0.630	0.027	0.679	0.050	0.704	3150	0.045	3233	0.084	3276
0.650	0.028	0.702	0.053	0.729	3350	0.046	3435	0.086	3479
0.670	0.028	0.722	0.053	0.749	3550	0.046	3635	0.086	3679
0.710	0.028	0.762	0.053	0.789	3750	0.047	3838	0.089	3883
0.750	0.030	0.805	0.056	0.834	4000	0.047	4088	0.089	4133
0.800	0.030	0.855	0.065	0.884	4250	0.049	4341	0.092	4387
0.850	0.032	0.909	0.060	0.939	4500	0.049	4591	0.092	4637
0.900	0.032	0.959	0.060	0.989	4750	0.050	4843	0.094	4891
0.950	0.034	1012	0.063	1044	5000	0.050	5093	0.094	5141

Seguidamente se calcula el factor de ocupación de la ranura que es la relación entre la sección que ocupan los conductores y la área de la ranura.

Espacio ocupado por los conductores:

$$A_1 = Z_1 \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot d_{11}^2 \qquad (29)$$

Donde,

A_1: área conductores [mm^2]
Z_1: número máximo de conductores por ranura
d_{11}: diámetro del conductor desnudo [mm]

El factor de ocupación es el siguiente:

$$\frac{A_1}{a_z} = F \qquad (30)$$

Donde,

A_1: área conductores [mm^2]
a_z: área de la ranura [mm^2]
F: factor de ocupación [≤ 0.4]

Es recomendable que el factor de ocupación no sobrepase el valor de 0,4. Por motivos de montaje es necesario dejar un espacio suficiente de margen, ya que hay que tener en cuenta que los conductores van protegidos con aislante para evitar el contacto directo con el estator y que entre los conductores quedan espacios de aire.

Se podría dar el caso de que el factor de ocupación sobrepasara el límite, pero para ello existen diferentes maneras para solucionarlo:

a) Es posible aumentar densidad de corriente hasta el límite máximo.

b) Dividir el conductor de cada fase en diversos hilos de igual sección conectados en paralelo y haciendo que coincida la suma de secciones con la sección del conductor necesario.

c) Cambiar la chapa con ranuras más grandes.

2.5. Diseño del rotor

El rotor es la parte móvil inducida por el inductor (devanados del estator) el cual transmitirá la energía eléctrica a energía mecánica giratoria.

2.5.1. Entrehierro

El entrehierro es el espacio de aire que separa el diámetro interior del estator y el diámetro exterior del rotor. Evidentemente el diámetro exterior del rotor y el interior del estator no son iguales ya que el rotor es necesario que gire.

El diámetro exterior del rotor se escoge una vez sabemos el espacio de aire que debe haber entre diámetro interior del estator y el diámetro exterior del rotor. El rotor se fabrica a medida.

Es necesario que el grosor del entrehierro sea mínimo de 0,2 mm.

El entrehierro es calculado de la siguiente manera:

$$l_g = \frac{0.007 \cdot D}{\sqrt{p}} \tag{31}$$

Donde,

l_g: distancia entrehierro [mm]
D: diámetro interior del estator [mm]
p: número de polos

Una vez se encuentra el entrehierro se puede dimensionar el diámetro exterior del rotor:

$$D_r = D - 2 \cdot l_g \tag{32}$$

Donde,

D_r: diámetro del rotor [mm]
l_g: distancia entrehierro [mm]
D: diámetro interior del estator [mm]

2.5.2. Número de ranuras del rotor

El número de ranuras del rotor se elige para que no aparezca ruido en el motor. Un motor silencioso se dará cuando no haya campos harmónicos.

Se han sugerido muchas reglas empíricas para la mejor relación de ranuras del estator y del rotor con el fin de eliminar los campos armónicos.

Basándose en la experiencia de motores de inducción monofásicos comercializados la fórmula que más se adecua a este tipo de motores es la siguiente:

$$Ranuras_{aproximadas} = S_s + (2 \cdot p) \tag{33}$$

Donde,

S_s: número de ranuras del estator
p: número de polos

2.5.3. Barras del rotor

Las barras del rotor son generalmente de aluminio y se conectan entre si poniendo en un extremo un anillo en cortocircuito, formando así la jaula.

El área de las barras es la siguiente:

$$A_r = S_r \cdot\ a_b \tag{34}$$

Donde,

A_r: área total de las barras del rotor [mm^2]
S_r: número de ranuras del rotor
a_b: área de una barra [mm^2]

2.5.4. Anillo

El anillo es un elemento que va en un extremo del rotor, el cual es el encargado de interconectar todas las barras del rotor y de esta manera cortocircuitarlas.

El anillo debe tener una superficie igual a:

$$a_{co} = \frac{0.32 \cdot A_r}{p} \tag{35}$$

Donde,

a_{co}: área del anillo [mm^2]
A_r: área total de las barras del rotor [mm^2]
p: número de polos

Una vez se tiene la superficie necesaria, se encontrará el espesor del anillo para que cumpla con el área encontrada anteriormente. La sección del anillo final será:

$$t_c = \frac{a_{co}}{d_c} \tag{36}$$

$$a_c = d_c \cdot t_c \tag{37}$$

Donde,

d_c: anchura de la ranura del rotor redondeada [mm]
t_c: espesor del anillo [mm]

Entonces se podrán definir las dimensiones del anillo:

$$D_{cro} = D_r \tag{38}$$

$$D_{cri} = D_{cro} - 2d_c \tag{39}$$

$$D_c = \frac{(D_{cro} - D_{cri})}{2} + D_{cri} \tag{40}$$

Donde,

D_{cro}: diámetro exterior del anillo [mm]
D_{cri}: diámetro interior del anillo [mm]
D_c: diámetro medio del anillo [mm]

2.5.5. Coeficiente de Carter

Para realizar posteriores cálculos analíticos será necesario conocer la inducción media. Se puede encontrar una aproximación con el coeficiente de *Carter.*

Las irregularidades en el entrehierro hacen que la inducción se comporte como si el entrehierro fuera más grande de lo que es físicamente. El factor de *Carter* ayuda a indicar el incremento para tal de obtener un entrehierro equivalente a un estator y un rotor lisos.

Para ello se busca:

$$K_{os} = \frac{1}{1+5\cdot\frac{l_g}{W_{os}}} \quad (41)$$

$$K_{gss} = \frac{y_{ss}\cdot 10^3}{[(y_{ss}\cdot 10^3)-(K_{os}\cdot W_{os})]} \quad (42)$$

$$K_{cs} = \frac{1}{1+5\cdot\frac{l_g}{W_{or}}} \quad (43)$$

$$y_{sr} = \frac{\pi\cdot D_r}{S_r} \quad (44)$$

$$K_{gsr} = \frac{y_{sr}}{[(y_{sr})-(K_{cs}\cdot W_{or})]} \quad (45)$$

Donde el factor de *Carter* es el siguiente:

$$K_g = K_{gss}\cdot K_{gsr} \quad (46)$$

Donde,

K_g: coeficiente de Carter
K_{gss}: coeficiente de Carter para el estator
K_{gsr}: coeficiente de Carter para el rotor
l_g: distancia entrehierro [mm]
y_{ss}: paso de ranura estator [mm]
y_{sr}: paso de ranura rotor [mm]
W_{os}: abertura ranura del estator [mm]
W_{or}: abertura ranura del rotor [mm]

2.5.6. Factor de saturación

Para motores de inducción monofásicos los valores estimados de saturación suelen estar entre 1.1 y 1.35.

2.6. Resistencias

2.6.1. Resistencia en el devanado principal del estator

Para calcular la resistencia por fase en el estator se utiliza las siguientes formulas:

$$r_{smhot} = \rho_{75ºC} \frac{T_m \cdot L_{mtm}}{a_m} \quad (47)$$

$$r_{smcold} = \rho_{20ºC} \frac{T_m \cdot L_{mtm}}{a_m} \quad (48)$$

Donde,

r_{smhot}: resistencia del devanado principal a 75ºC [Ω, ohms]
r_{smcold}: resistencia del devanado principal a 20ºC [Ω, ohms]
$\rho_{75ºC}$: resistividad del cobre a 75ºC [Ω·mm^2/m]
$\rho_{20ºC}$: resistividad del cobre a 20ºC [Ω·mm^2/m]
T_m: número de vueltas en serie en el devanado principal
L_{mtm}: longitud media de una espira

2.6.2. Resistencia del rotor referida al estator

La resistencia en el rotor es aproximadamente la resistencia en las barras y la resistencia en el anillo.

Es necesario encontrar la longitud de las barras del rotor y para ello hay que tener en cuenta que el rotor se monta con un empilado inclinado. El objetivo de dicho montaje es eliminar harmónicos.

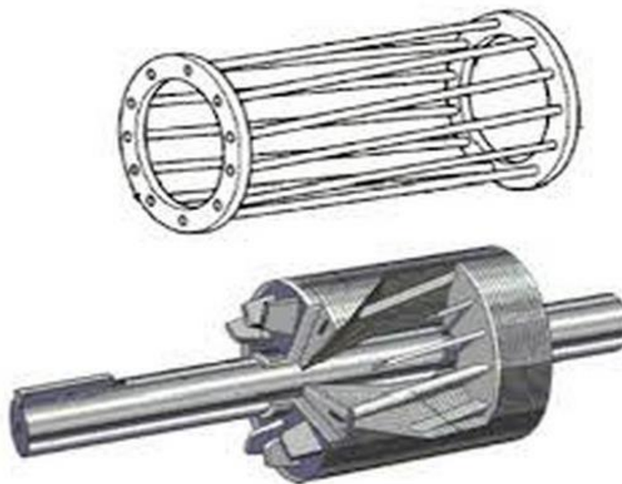


Figura 15. *Rotor inclinado*

$$L_b = \sqrt{L^2 + y_{sr}{}^2} \tag{49}$$

Donde,

L_b: longitud de una barra del rotor [mm]
L: longitud del rotor [mm]
y_{sr}: paso de ranura del rotor [mm]

Cuando el grosor del anillo es grande, como pasa a menudo en motores de inducción pequeños, la resistencia del anillo debe ser multiplicada por una constante que hay que tener en cuenta, ya que la distribución del corriente no es uniforme en el anillo.

Esta constante se encuentra con la siguiente relación:

$$\frac{D_{cri}}{D_{cro}} \tag{50}$$

Donde,

D_{cro}: diámetro exterior del anillo [mm]
D_{cri}: diámetro interior del anillo [mm]

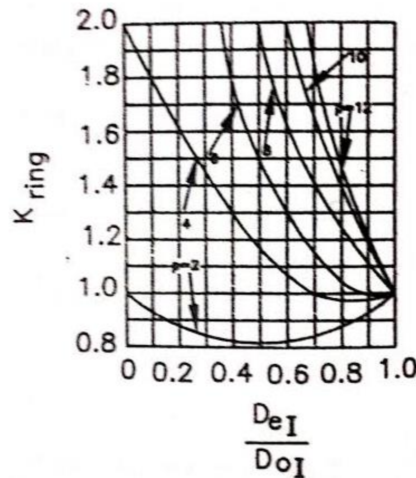


Figura 16. *Factor de corrección del corriente no uniforme en el anillo*

La resistencia del rotor referida al estator es la siguiente:

$$r_{rmhot} = 8 \cdot T_m{}^2 k_{wm}{}^2 \cdot \rho_{75^{\circ}C} \left[\frac{L_b}{S_r \cdot a_b} + \frac{2 \cdot D_c \cdot k_{ring}}{\pi \cdot p^3 a_c}\right] \tag{51}$$

$$r_{rmcold} = 8 \cdot T_m{}^2 k_{wm}{}^2 \cdot \rho_{20^{\circ}C} \left[\frac{L_b}{S_r \cdot a_b} + \frac{2 \cdot D_c \cdot k_{ring}}{\pi \cdot p^3 a_c}\right] \tag{52}$$

Donde,

r_{rmhot}: resistencia del rotor referida al estator [Ω]
T_m: número de vueltas en serie en el devanado principal
k_{wm}: factor de distribución
$\rho_{75^{\circ}C}$: resistividad del cobre a 75ºC [Ω·mm^2/m]
L_b: longitud de una barra del rotor [m]

S_r: número de ranuras del rotor
a_b: área de una barra [mm^2]
D_c: diámetro medio del anillo [mm]
d_c: grosor de la ranura del rotor redondeada [m]
k_{ring}: constante del anillo

2.7. Reactancias

La reactancia es una medida del flujo magnético, a partir de la corriente que fluye por un circuito eléctrico y que establece un flujo en una determinada zona de la máquina. Dependiendo de la situación, hablaremos de reactancia principal, de dispersión de ranura, de cabeza de devanado, de ZigZag, etc.

2.7.1. Reactancia de dispersión de ranura

Esta reactancia depende directamente de la geometría de las ranuras. Se determina por el flujo que aparece en la parte superior de un diente con la parte superior de otro diente.

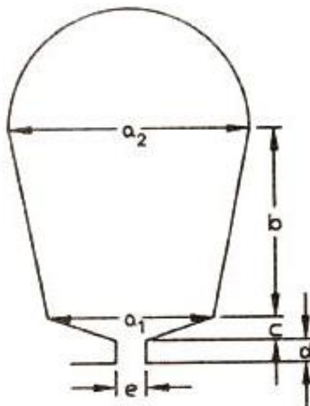


Figura 17. *Ranura 1 estator*

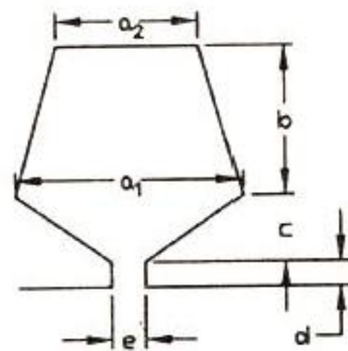


Figura 18. *Ranura 2 estator*

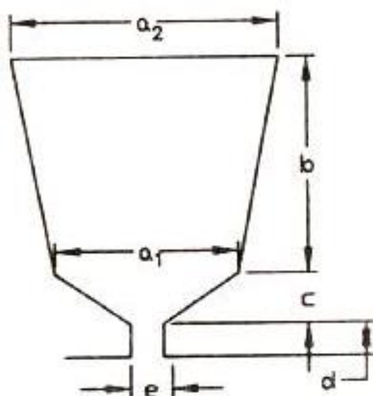


Figura 19. *Ranura 3 estator*

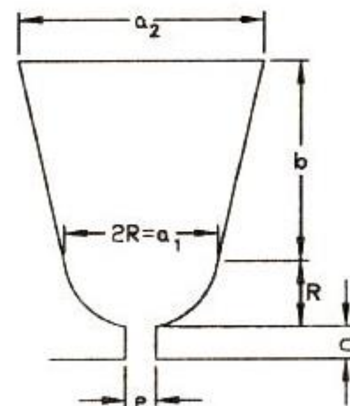


Figura 20. *Ranura 4 estator*

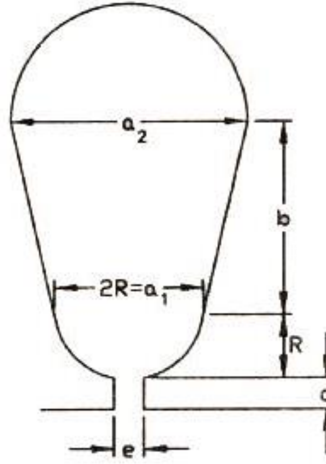


Figura 21. *Ranura 5 estator*

Como se muestra en las figuras existen varios tipos de ranuras, en este caso se escoge la ranura que más se aproxima a la ranura del estator escogido.

Existen varios modelos de fórmulas para calcular la permeabilidad específica de las ranuras, estos dependerán del tipo de ranura seleccionada.

- Estator:

- Figura 17:

$$\lambda_{ss} = \mu_0 \left[F + \frac{d}{e} + \frac{2c}{e+a_1}\right] \tag{53}$$

- Figura 18 y 19:

$$\lambda_{ss} = \mu_0 \left[\Phi + \frac{b}{a_2} + \frac{d}{e} + \frac{2c}{e+a_1}\right] \tag{54}$$

- Figura 20:

$$\lambda_{ss} = \mu_0 \left[\Phi + \frac{b}{a_2} + \frac{\pi}{4} + \frac{cos^{-1}\left(\frac{e}{2R}\right)}{90º}\right] \tag{55}$$

- Figura 21:

$$\lambda_{ss} = \mu_0 \left[\mathrm{F} + \frac{d}{e} + \frac{\pi}{4} + \frac{cos^{-1}\left(\frac{e}{2R}\right)}{90º}\right] \tag{56}$$

Para encontrar los valores F y Φ es necesario encontrar las siguientes relaciones:

$$\frac{b}{a_2} \tag{57}$$

$$\frac{a_1}{a_2} \tag{58}$$

Donde,

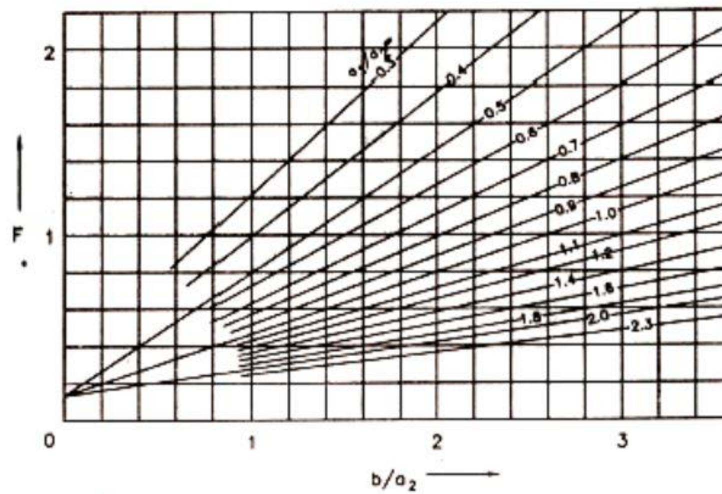


Figura 22.

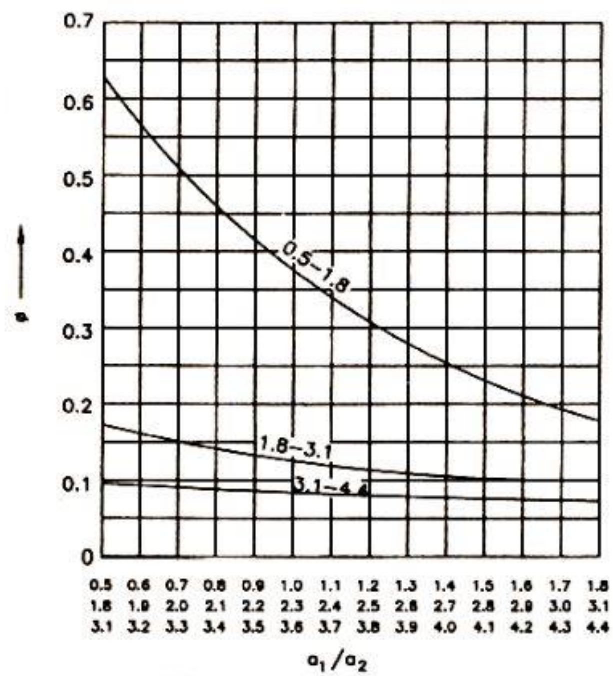


Figura 23.

- Rotor:

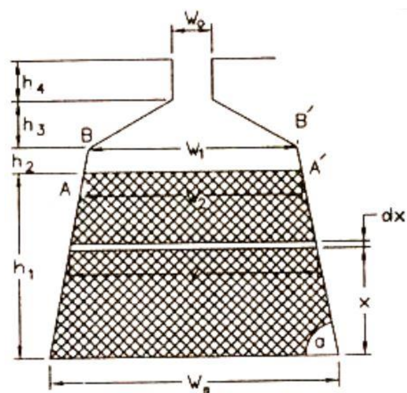


Figura 24. *Ranura del rotor*

$$\lambda_{sr} = \mu_0 \left[\frac{h_1}{3 \cdot W_s} + \frac{h_2}{W_s} + \frac{2h_3}{W_s + W_o} + \frac{h_4}{W_o}\right] \quad (59)$$

$$C_x = \frac{(Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^3 + \cdots)}{(Z_1 + Z_2 + Z_3 + \cdots)^2} \cdot \frac{1}{K_{wm}^{\ 2}} \cdot \frac{S_s}{4p} \quad (60)$$

Donde,

C_x: factor de corrección que permite utilizar ($T_m K_{wm}$) en la ecuación.

μ_0: permeabilidad del aire [Tm/A]

Reactancia de dispersión en la ranura del estator:

$$x_{ss} = 16 \cdot \pi \cdot f\ (T_m \cdot k_{wm})^2 \cdot \frac{L \cdot \lambda_{ss} \cdot C_x}{S_s}\ [\Omega] \quad (61)$$

Reactancia de dispersión en la ranura del rotor:

$$x_{ss} = 16 \cdot \pi \cdot f\ (T_m \cdot k_{wm})^2 \cdot \frac{L \cdot \lambda_{sr}}{S_r} [\Omega] \quad (62)$$

Reactancia de dispersión total en la ranura referida al estator:

$$x_s = x_{ss} + x_{sr}\ [\Omega] \quad (63)$$

2.7.2. Reactancia de dispersión en zigzag

La reactancia en zigzag se determina por el flujo que pasa de un diente a otro cruzando el entrehierro en forma de zigzag. Este flujo depende del entrehierro y de las posiciones relativas de los dientes.

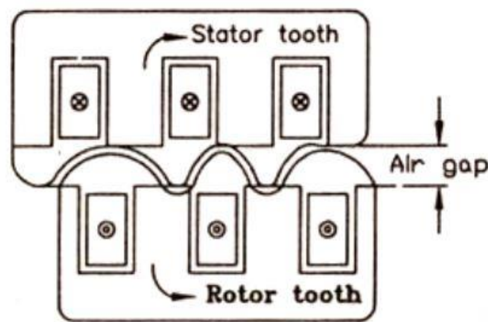


Figura 25. *Reactancia de dispersión en Zig-Zag*

$$\lambda_z = \mu_0 \left[\frac{W_{tso} \cdot W_{tr} \cdot (W_{tso}{}^2 + W_{tr}{}^2)}{12 \cdot l_g \cdot y_{ss}{}^2 \cdot y_{sr}} \right] \quad (64)$$

Donde,

$W_{tso} = y_{ss} - W_{os}$ [mm]
$W_{tr} = y_{sr} - W_{or}$ [mm]
y_{ss}: paso de ranura del estator [mm]
y_{sr}: paso de ranura del rotor [mm]
W_{os}: abertura ranura del estator [mm]
W_{or}: abertura ranura del rotor [mm]
l_g: distancia entrehierro [mm]
μ_0: permeabilidad del aire [Tm/A]

La reactancia en ZigZag es la siguiente:

$$x_z = 16 \cdot \pi \cdot f\ (T_m \cdot k_{wm})^2 \cdot \frac{L}{S_s} \cdot \lambda_z\ [\Omega] \quad (65)$$

2.7.3. Reactancia de dispersión en cabeza del devanado

Esta reactancia aparece en la cabeza de los devanados, debida al número de espiras y la separación que queda entre el núcleo y el cobre.

$$x_0 = 16 \cdot \pi \cdot f\ (T_m \cdot k_{wm})^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot L}{6.4 \cdot S_s \cdot p} \cdot [\pi \cdot (D + d_{ss}) \cdot coilspan]\ [\Omega] \quad (66)$$

Donde,

f: frecuencia [Hz]
T_m: número de vueltas en serie en el devanado principal
k_{wm}: factor de distribución
μ_0: permeabilidad del aire [Tm/A]
D: diámetro interior estator [m]
S_s: número de ranuras del estator
p: número de polos
d_{ss}: profundidad de la ranura del estator [m]
L: longitud de la máquina [m]

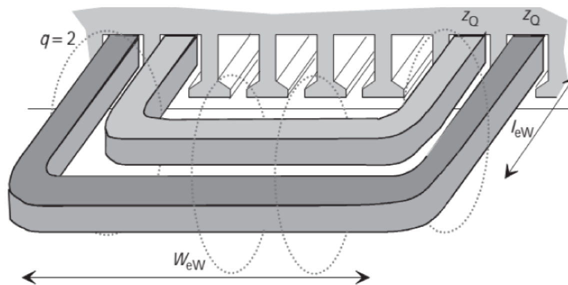


Figura 26. *Flujo de dispersión en cabeza del devanado*

2.7.4. Reactancia de magnetización

La reactancia de magnetización se calcula de la siguiente forma:

$$x_{ss} = 16 \cdot \pi \cdot f\ (T_m \cdot k_{wm})^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot L \cdot \tau}{10 \cdot l_g \cdot K_g \cdot p \cdot F_s}\ [\Omega] \tag{67}$$

Donde,

K_g: coeficiente de *Carter*
F_s: factor de saturación
τ: paso polar [m]

2.7.5. Reactancia de ranuras sesgadas

Esta reactancia aparece solo cuando las ranuras del rotor están sesgadas (en diagonal). El sesgado se hace generalmente en motores de inducción de jaula de ardilla para eliminar armónicos y ruido.

Se calcula de la siguiente forma:

$$\theta_s = \left(\frac{\pi}{\frac{S_r}{p}}\right) \cdot \left(\frac{S_r}{S_s}\right) \tag{68}$$

$$x_{sk} = X_m \cdot \left(\frac{{\theta_s}^2}{12}\right)\ [\Omega] \tag{69}$$

2.7.6. Reactancia total de dispersión referida al estator

Es la suma de todas las reactancias anteriormente calculadas.

$$X_{lm} = x_s + x_z + x_0 + x_{sk}\ [\Omega] \tag{70}$$

La reactancia en vacío es la siguiente:

$$X_{om} = X_m + \left(\frac{X_{lm}}{2}\right) [\Omega] \tag{71}$$

Factor de reactancia:

$$K_r = \left(\frac{X_{om} - X_{lm}}{X_{om}}\right) \tag{72}$$

$$K_i = \sqrt{K_r} \tag{73}$$

2.8. Pérdidas

Las pérdidas del hierro en el núcleo y en los dientes se encuentran calculando sus densidades y pesos.

Las pérdidas totales del hierro para motores de inducción se aproxima a 2.2 veces la suma de las pérdidas en los dientes del estator y del núcleo debido a la inducción y la frecuencia fundamental.

Entonces se encontrará las pérdidas de la siguiente manera:

$$m_{teeth} = S_s \cdot W_{ts} \cdot d_{ss} \cdot L_i \cdot \delta_{fe} \tag{74}$$

Donde,

m_{teeth}: peso de los dientes del estator [Kg]
S_s: número de ranuras del estator
W_{ts}: ancho de diente del estator [mm]
L_i: longitud neta del hierro [mm]
d_{ss}: profundidad de la ranura del estator [m]
δ_{fe}: densidad del hierro [kg/m^3]

$$B_{teeth} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot B_{ts} \tag{75}$$

Donde,

B_{teeth}: inducción máxima en los dientes del estator [T]
B_{ts}: inducción media [T]

Se interpola la inducción para encontrar las pedidas (W/Kg) en la siguiente tabla:

Tabla 3. *Característica B(T) del material M600-50A. Característica Pfe(B) del material M600-50A. Pérdidas (W/Kg) a 50 Hz)*

B :=	H :=	Pmag :=
0	0	0
.1	65.6	0.04
.2	83.8	.160
.3	94.1	.330
.4	103	.54
.5	110	.78
.6	118	1.04
.7	127	1.32
.8	136	1.63
.9	147	1.959
1.0	159	2.339
1.1	177	2.76
1.2	205	3.23
1.3	255	3.78
1.4	370	4.43
1.5	718	5.17
1.6	1840	5.94
1.7	4370	6.6
1.8	8330	7.06

Entonces se encuentran las pérdidas totales del hierro en los dientes del estator:

$$P_{teeth} = m_{teeth} \cdot P_{mag} \; [W] \tag{76}$$

Se encuentran las pérdidas en el núcleo del estator:

$$D_{medio} = D_o - d_{sc} \; [m] \tag{77}$$

Donde,

D_o: diámetro exterior del estator [m]
d_{sc}: profundidad del núcleo del estator [m]

$$m_{core} = \pi \cdot D_{medio} \cdot d_{sc} \cdot L_i \cdot \delta_{fe} \tag{78}$$

Donde,

m_{core}: peso del núcleo del estator [Kg]
D_{medio}: diámetro medio del estator [m]
d_{sc}: profundidad del núcleo del estator [m]
L_i: longitud neta del hierro [mm]

Igual que para encontrar las pérdidas (W/Kg) en los dientes, se interpolara para encontrarlas en el núcleo del estator. Se interpola la inducción en el núcleo B_{cs} utilizando la tabla 2.

Las pérdidas en el núcleo del estator son:

$$P_{core} = m_{core} \cdot P_{mag} \; [W] \tag{79}$$

Las pérdidas totales debidas a la inducción y la frecuencia fundamental son:

$$P_{totaliron} = P_{core} + P_{teeth} \; [W] \tag{80}$$

Como anteriormente se explica se multiplica 2.2 a las pérdidas totales:

$$P_{losscore} = 2.2 \cdot (P_{core} + P_{teeth}) \; [W] \tag{81}$$

Se estiman pérdidas por fricción y resistencia al viento con un valor de:

$$P_{FW} = 15 \; [W] \tag{82}$$

Posteriormente se calcularán las pérdidas del cobre y de las barras del rotor mediante el método de Veinott.

2.9. Condiciones nominales (Método de *Veinott*)

Se encuentran las características del motor utilizando el método de *Veinott*. Podremos encontrar a condiciones nominales, la potencia entregada, la velocidad del motor, el rendimiento, el par, el factor de potencia, etc. También encontraremos las pérdidas del cobre y de las barras del rotor.

En el Anexo se adjuntará la pauta realizada con *Mathcad*, en la cual se ha automatizado para encontrar todas las características del motor dependiendo de la velocidad.

Las constantes del motor son:

- Voltaje: V [V]
- Reactancia total: X_{lm} [Ω]
- Reactancia en vacío: X_{om} [Ω]
- Resistencia del devanado principal: r_{smhot} [Ω]
- Resistencia del rotor referida al estator: r_{rmhot} [Ω]K_i
- Pérdidas del hierro:$P_{losscore}$ [W]
- Pérdidas de fricción y resistencia al viento: P_{FW} [W]

Entonces:

$$I_m = \frac{V}{X_{om}} \quad (83)$$

Donde,

I_m: corriente de vacío [A]

Con estos valores se puede aplicar el método de *Veinott.*

$$F_1 = \left[2 - \left({K_i}^2\right)\right] \cdot r_{rmhot} \quad (84)$$

$$F_2 = \left[(2 \cdot r_{smhot}) + r_{rmhot}\right] \cdot \left(\frac{r_{rmhot}}{X_{om}}\right) \quad (85)$$

$$F_3 = (I_m \cdot r_{rmhot}) \cdot \left(\frac{r_{rmhot}}{X_{om}}\right) \quad (86)$$

$$F_4 = 2 \cdot I_m \cdot r_{rmhot} \quad (87)$$

$$F_5 = (I_m \cdot r_{rmhot}) \cdot K_i \quad (88)$$

$$F_6 = (I_m \cdot r_{rmhot} \cdot K_i)^2 \cdot r_{rmhot} \quad (89)$$

$$F_7 = V \cdot K_i \quad (90)$$

$$F_8 = (V \cdot K_i)^2 \cdot r_{rmhot} \quad (91)$$

$$F_9 = \frac{P_{losscore}}{2 \cdot V} \quad (92)$$

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \quad (93)$$

$$c = 1 - s \tag{94}$$

$$U = \left[[1 - c^2] \cdot r_{rmhot}\right] + F_1 \tag{95}$$

$$W = \left[[1 - c^2] \cdot X_{lm}\right] - F_2 \tag{96}$$

$$M = \left[[1 - c^2] \cdot V\right] - F_3 \tag{97}$$

$$N = M + (F_9 \cdot U) \tag{98}$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{N^2 + {F_4}^2}}{\sqrt{U^2 + W^2}} \tag{99}$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{[(1-c^2)F_7]^2 + {F_5}^2}}{\sqrt{U^2 + W^2}} \tag{100}$$

$$I_3 = \frac{c \cdot F_5}{\sqrt{U^2 + W^2}} \tag{101}$$

$$copperloss_1 = {I_1}^2 \cdot r_{smhot} \tag{102}$$

$$copperloss_{2m} = {I_2}^2 \cdot r_{rmhot} \tag{103}$$

$$copperloss_{2s} = {I_3}^2 \cdot r_{rmhot} \tag{104}$$

$$coreloss_m = \frac{P_{losscore}}{2} \tag{105}$$

$$Input = copperloss_1 + copperloss_{2m} + copperloss_{2s} + coreloss_m + \left[\left[[(1 - c^2) \cdot F_8] - F_6\right] \cdot \left[\frac{c^2}{\left(\sqrt{U^2 + W^2}\right)^2}\right]\right] \tag{106}$$

$$Input = \left[[(1 - c^2) \cdot F_8] - F_6\right] \cdot \left[\frac{c^2}{\left(\sqrt{U^2 + W^2}\right)^2}\right] \tag{107}$$

$$RPM = c \cdot n_{syn} \tag{108}$$

$$T_{main} = \left(\frac{60}{2\pi}\right) \cdot \left(\frac{Output}{RPM}\right) \tag{109}$$

$$Efficiency = \left(\frac{Output}{Input}\right) \tag{110}$$

$$PF = \frac{Input}{V \cdot I_1} \tag{111}$$

Tal y como se especifica en el apartado 2.9 las pérdidas del cobre y del aluminio son encontradas en condiciones nominales:

- Pérdidas del cobre:

$$copperloss_1 = {I_1}^2 \cdot r_{smhot}\ [W] \tag{112}$$

- Pérdidas del aluminio en las barras del rotor:

$$P_{alum} = ({I_2}^2 \cdot r_{rmhot}) + ({I_3}^2 \cdot r_{rmhot})\ [W] \quad (113)$$

2.10. Diseño del devanado de arranque

Una vez se tiene diseñado el devanado principal, el siguiente paso es el diseño del devanado de arranque. El devanado de arranque es el encargado de iniciar un campo eléctrico giratorio, este campo lo crea al desfasarse 90 grados del corriente del devanado principal. El devanado de arranque habrá que ajustarlo a las ranuras del estator y a su vez encontrar un número de vueltas para que tenga una reactancia más alta y una resistencia más baja que el devanado principal.

Existe una fórmula para encontrar el número de vueltas que debe haber en el devanado de arranque dependiendo del devanado principal.

El número de vueltas necesarias en el devanado de arranque es el siguiente:

$$T_a = K \cdot T_m \left(\frac{k_{wm}}{k_{wa}}\right) \quad (114)$$

$$T_{pa} = \frac{T_a}{p} \quad (115)$$

Donde,

T_a: número de vueltas en serie en el devanado de arranque
T_m: número de vueltas en serie en el devanado principal
K: relación de vueltas entre devanado de arranque y devanado principal
K_{wm}: factor de distribución del devanado principal
K_{wa}: factor de distribución del devanado de arranque
T_{pa}: número de vueltas por polo en el devanado de arranque

Según el devanado principal del ejemplo anterior en este caso el devanado de arranque sería el siguiente:

$$T_{pa} = \frac{656}{4} = 164 \quad (116)$$

La distribución sinusoidal será la siguiente:

sin [(3/9) x 90º]=0.500
sin [(5/9) x 90º]=0.766
sin [(7/9) x 90º]=0.940
sin [(9/9) x 90º]=1.000
TOTAL=3.206

Vueltas en las cuatro bobinas:

(0.500/3.206) x 164 = 26
(0.766/3.206) x 164 = 39
(0.940/3.206) x 164 = 48
(1.000/3.206) x 164 = 50
TOTAL=163

Entonces se verifica el factor de distribución del devanado de arranque:

$$k_{wa} = \frac{\%(2-8)\cdot Turns(2-8) + \%(3-7)\cdot Turns(3-7) + \%(4-6)\cdot Turns(4-6) + \%(5-5)\cdot Turns(5-5)}{Turns(2-8) + Turns(3-7) + Turns(4-6) + Turns(5-5)} \quad (117)$$

Es necesario verificar que cuando el devanado principal y el devanado de arranque comparten ranura no exceden el factor de ocupación igual a 0.4. Para ello se utiliza la peor de las configuraciones, dónde existen el número máximo de vueltas del devanado principal y el número máximo de vueltas del devanado de arranque en una misma ranura.

La peor configuración es cuando comparten ranura el devanado principal y de arranque:

$$d_{aux} = \sqrt{\frac{\left[(0.4\cdot a_Z) - Z_{S1}\cdot\frac{\pi}{4}\cdot d_m{}^2\right]\cdot 4}{Z_{aux}\cdot\pi}} \quad (118)$$

Donde,
d_{aux}: diámetro máximo del devanado de arranque [mm]
a_z: área ranura del estator [mm^2]
Z_{s1}: número máximo de vueltas por ranura del devanado principal
d_m: diámetro del devanado principal [mm]
Z_{aux}: número máximo de vueltas por ranura del devanado de arranque

La peor configuración cuando comparten ranura dos devanados de arranque:

$$d_{aux} = \sqrt{\frac{0.4\cdot a_Z\cdot 4}{2\cdot Z_{aux}\cdot\pi}} \quad (119)$$

Longitud media de vuelta para el devanado de arranque:

$$L_{ml} = \frac{8.4\ (D+d_{ss})}{S_s}\cdot slots\ spanned + 2L \quad (120)$$

$$L_{m.ta} = \frac{n^o vueltas\cdot Longitud\ (2-8) + n^o vueltas\cdot Longitud\ (3-7) + n^o vueltas\cdot Longitud\ (4-6) + n^o vueltas\cdot Longitud\ (5-5)}{TOTAL n^o Vueltas} \quad (121)$$

El área del conductor es:

$$a_a = \pi\cdot\left(\frac{d_{aux}}{2}\right)^2\ [mm^2] \quad (122)$$

Se encuentra entonces la longitud media de vuelta del devanado de arranque:

$$L_{m.ta} = \frac{TOTAL_{L_{ml}}}{T_{pa}} \quad (123)$$

Donde,

$TOTAL_{L_{ml}}$: suma de la longitud media de vuelta del devanado de arranque para cada bobina

2.10.1. Resistencias y reactancias en el devanado de arranque

Las resistencias en el devanado de arranque se calculan a temperatura ambiente (20ºC).

La resistencia del devanado de arranque es:

$$r_{sa} = \rho_{20ºC} \cdot \left(\frac{T_a \cdot L_{m.ta}}{a_a}\right) \ [\Omega] \quad (124)$$

Resistencia total en términos de devanado principal:

$$R_{sm} = r_{smcold} + r_{rmcold} \ [\Omega] \quad (125)$$

Resistencia del rotor en función del devanado de arranque:

$$r_{ra} = K^2 \cdot r_{rmcold} \ [\Omega] \quad (126)$$

Resistencia total en términos del devanado de arranque:

$$R_a = r_{sa} + r_{ra} \ [\Omega] \quad (127)$$

Reactancia de fuga total en términos del devanado de arranque:

$$X_{la} = K^2 \cdot X_{lm} \ [\Omega] \quad (128)$$

Impedancia del devanado principal con el rotor bloqueado:

$$Z_m = \sqrt{(R_{sm})^2 + (X_{lm})^2} \ [\Omega] \quad (129)$$

Reactancia capacitiva requerida para un máximo par de arranque:

$$X_c = X_{la} + \left(\frac{R_a \cdot R_{sm}}{Z_m + X_{lm}}\right) [\Omega] \quad (130)$$

Capacidad:

$$C = \frac{10^6}{2\pi \cdot f \cdot X_c} \ [\mu F] \quad (131)$$

Según la capacidad obtenida habrá que seleccionar un condensador de un catálogo industrial.

Tabla 4. *Condensadores para arranque de motores*

110 Vca.	220 Vca.	330 Vca.
60 / 70 µf	60 / 70 µf	50 / 60 µf
70 / 90 µf	70 / 90 µf	70 / 90 µf
80 / 100 µf	80 / 100 µf	80 / 100 µf
100 / 120 µf	100 / 120 µf	100 / 120 µf
120 / 140 µf	120 / 140 µf	101 / 107µf
140 / 160 µf	140 / 160 µf	120 / 140µf
170 / 190 µf	170 / 190 µf	140 / 160 µf
190 / 210 µf	190 / 210 µf	170 / 190 µf
210 / 240 µf	210 / 240 µf	210 / 240 µf
240 / 270 µf	240 / 270 µf	
270 / 310 µf	270 / 310 µf	
320 / 360 µf	320 / 360 µf	
350 / 400 µf	350 / 400 µf	
380 / 420 µf	380 / 420 µf	
400 / 430 µf	400 / 430 µf	
450 / 500 µf	450 / 500 µf	
500 / 600 µf	500 / 600 µf	
600 / 700 µf		
700 / 800 µf		

Impedancia del devanado de arranque con el condensador en serie:

$$Z_a = \sqrt{(R_a)^2 + (X_{la} - X_c)^2}\ [\Omega] \qquad (132)$$

2.10.1. Corrientes

Corriente del devanado principal con el rotor bloqueado:

$$I_{sm} = \frac{V}{Z_m}\ [A] \qquad (134)$$

Corriente del devanado de arranque con el rotor bloqueado:

$$I_{sa} = \frac{V}{Z_a}\ [A] \qquad (135)$$

Densidad de corriente en el devanado de arranque:

$$\delta_a = \frac{I_{sa}}{a_a}\ [\frac{A}{mm^2}] \qquad (136)$$

Corriente en los devanados conectados en paralelo y rotor bloqueado:

$$I_s = I_{sm} \cdot \frac{[[R_{sm}+(X_{lm})j]+[R_a+(X_{la}-X_c)j]]}{[R_a+(X_{la}-X_c)j]}\ [A] \qquad (137)$$

2.10.2. Par de arranque y nominal

El par de arranque para el motor monofásico de inducción es el siguiente:

$$T_s = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \cdot p \cdot C_r \cdot r_{rmcold} \cdot \frac{V^2}{f} \cdot \frac{R_a \cdot X_{lm} - R_m \cdot X_{la}}{{Z_m}^2 + {Z_a}^2} \; [Nm] \tag{138}$$

$$C_r = \frac{K}{1 + \left(\frac{r_{rmcold}}{X_{om}}\right)^2} \tag{139}$$

El par de arranque en motores con condensadores para el arranque se espera que sea al menos de un 300 por ciento más grande que el par nominal.

CAPÍTULO 3: CÁLCULO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Una vez determinadas las características del motor es necesario realizar simulaciones mediante un programa de elementos finitos para corroborar que el funcionamiento y el diseño del motor es el adecuado.

El programa utilizado es FEMM, que permite realizar análisis magnéticos, electroestáticos, de flujo de calor y de flujo de corriente. A demás, tiene la posibilidad de automatizar procesos gracias a la integración del lenguaje LUA.

3.1. Dibujo de la chapa con CAD

Para poder trabajar con el programa FEMM primero hay que dibujar la chapa del estator y del rotor con sus debidas medidas. Se dibujan según los planos de la chapa facilitados por el fabricante.

Una vez se tiene la chapa dibujada en CAD se guarda en formato *.dxf* ya que es el tipo de formato de archivo que el programa FEMM es capaz de leer.

El dibujo tendrá que estar dibujado en milímetros, ya que es como trabaja FEMM, y es importante centrar la chapa en el punto (0,0) ya que facilita la importación en *.dxf* al programa FEMM.

3.2. Configuración del problema

Se crea un nuevo problema *Magnetics Problem* y a continuación se importa el *.dxf* previamente dibujado con el programa CAD.

Se abre la pestaña *problema* donde se especifica las unidades en que esta el motor (mm) y su profundidad. Siempre se simulará a frecuencia 0Hz.

3.2.1. Definición de los materiales

FEMM incluye una gran librería de los materiales más comunes, pero a veces es necesario modificar alguno o crear alguno nuevo entrando manualmente los datos del material en sí. En este caso se utilizan los siguientes materiales:

- Aire: el aire vine predeterminado en la librería FEMM. Utilizado en el entrehierro de la máquina.

- Cobre: se coge de la librería y se modifica la conductividad [MS/m]. Se escoge cable magnético y el diámetro [mm] del conductor.

- Acero: el acero utilizado para este motor es el M600-50. Se crea el material y se le introduce la curva característica del material B-H proporcionada por el fabricante. También la conductividad eléctrica [MS/m] y se asigna el grosor del laminado en milímetros.

- Aluminio: se coge también de la librería.

- Acero inoxidable: se coge el acero inoxidable *316 Stainless Steel* para el eje.

3.2.2. Definición devanados del estator

Es necesario crear los circuitos que formarán parte de la máquina analizada. En este caso al ser un motor de inducción monofásico se crearán dos circuitos, un circuito para el devanado principal y el otro para el devanado de arranque. Se creará el circuito A para el devanado principal y el circuito AUX para el devanado de arranque. Para ello se selecciona la pestaña *propierties->circuits*. Con la opción *Add propierty* se añade el circuito y se le indica el corriente que circulará, en este caso la corriente en vacío por el devanado principal.

Hay que determinar en FEMM como están montados los devanados en cada ranura. Para ello será necesario coger el número de conductores por ranura obtenido en la pauta analítica. Estos conductores serán un número positivo o negativo en función del sentido del corriente en cada ranura.

3.2.3. Asignación de los materiales

Una vez definidos todos los materiales a utilizar, es necesario asignar a cada parte del motor su material correspondiente. Habrá que asignar materiales a:

- Entrehierro
- Chapa del estator
- Chapa del rotor
- Ranuras del estator
- Ranuras del rotor
- Eje

3.2.4. Condiciones de contorno

Se crea una condición de contorno (A=0) con *propierties->boundary* del tipo *Prescribed A.* Se le asignará esta condición a todas las líneas del contorno exterior del estator.

3.3. Análisis magnéticos

3.3.1. Verificación de las inducciones

Una vez definido por completo el problema magnético, se comprueban que las inducciones son correctas para que el motor no este saturado. El motor se simula con corriente en vacío en el devanado principal y corriente cero en el devanado de arranque, ya que interesa saber las inducciones una vez el motor ya ha arrancado y por lo tanto el devanado de arranque ya ha está desconectado.

La inducción máxima permitida es 2.1T

3.3.2. Cálculo de las pérdidas

Las pérdidas están directamente relacionadas con el calentamiento de la máquina. Una vez hecha la simulación de las inducciones se abre la pestaña de post-proceso y desde ahí ventana *Open Lua Script.* Entonces se abre el LUA para que calcule y muestre las pérdidas del hierro de la máquina.

El cálculo de las pérdidas por efecto Joule se calculan utilizando la opción de seleccionar áreas de FEMM. Entonces se seleccionan los devanados del estator y se realiza la integral de área *total losses* para determinarlas.

Las pérdidas de las barras de aluminio del rotor se calculan con la pauta analítica.

Para el análisis térmico FEMM pide la densidad de pérdidas de cada material. Con la herramienta de selección de áreas se calcula el volumen del hierro del rotor, del hierro del estator, del cobre y del aluminio:

- Densidad de pérdidas del acero del estator:

$$Densidad_{M600-50E} = \frac{P_{M600-50E}}{V_{M600-50E}}\ [W/m^3] \tag{140}$$

- Densidad de pérdidas del acero del rotor:

$$Densidad_{M600-50R} = \frac{P_{M600-50R}}{V_{M600-50R}}\ [W/m^3] \tag{141}$$

- Densidad de pérdidas del cobre:

$$Densidad_{cobre} = \frac{P_{cobre}}{V_{cobre}}\ [W/m^3] \tag{142}$$

- Densidad de pérdidas del aluminio:

$$Densidad_{aluminio} = \frac{P_{cobre}}{V_{aluminio}} \; [W/m^3] \quad (143)$$

CAPÍTULO 4: CÁLCULO TÉRMICO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

El análisis térmico se hará mediante la opción de FEMM para problemas térmicos: *Heat Flow Problem.*

Es necesario realizar el cálculo térmico para determinar el calentamiento de la máquina y así poder encontrar las dimensiones de la carcasa y el aislante. La carcasa puede ser lisa o con aletas y puede llevar un sistema de ventilación forzada.

4.1. Dibujo en FEMM con CAD

Para realizar el análisis térmico es necesario crear un nuevo archivo en FEMM (*Heat Flow Problem)* y hará falta volver a importar el archivo *.dxf* de la chapa seleccionada dibujada en CAD. En este caso será necesario añadir un recubrimiento aislante en las paredes interiores de las ranuras. Un valor típico de aislamiento es el 0.25mm.

Si es necesario también se le añadirá al dibujo la carcasa seleccionada.

4.2. Definición de los materiales

Igual que en el análisis magnético es necesario definir los nuevos materiales y nuevas condiciones de contorno. Para definir los materiales es necesario tener en cuenta:

- Conductividad térmica constante [W/(mk)]
- Capacidad volumétrica calorífica [MJ/(m^3K)]
- Densidad de pérdidas [W/m^3]. Se introducen las densidades de pérdidas calculadas en el apartado 3.3.2

4.3. Análisis térmico

4.3.1. Ventilación natural

Los motores evacuan el calor por convección a través de la carcasa y el entrehierro.

En FEMM es necesario determinar la convección (*h*) como condición de contorno y la temperatura ambiente.

El coeficiente de convección para ventilación natural en la carcasa es:

$$h = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{carcasa}}} \ [W/m^2K] \tag{144}$$

El coeficiente de convección para ventilación natural en el entrehierro es:

$$h = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{rotor}}} \ [W/m^2K] \tag{145}$$

Donde,

ΔT: incremento de temperatura entre el punto más caliente de la máquina y la temperatura ambiente (Kelvins)
$D_{carcasa}$: diámetro de la carcasa [m]
D_{rotor}: diámetro de la carcasa [m]

Una vez definidas las condiciones de contorno hay que aplicarlas a todas las líneas externas de la carcasa y a todas las líneas que estén en contacto con el entrehierro respectivamente. Entonces definido el problema se lanza la simulación y FEMM crea un archivo gráfico de la distribución de las temperaturas.

Las temperaturas más relevantes son:

- Temperatura de la carcasa
- Temperatura del rotor
- Temperatura de los devanados
- Temperatura del entrehierro

4.3.2. Ventilación natural con carcasa y aletas

A menudo es necesario montar a los motores una carcasa con aletas, ya que mejora la refrigeración de los motores, debido a que las aletas aumentan la superficie de ventilación.

En este caso los coeficientes de convección se calcularan de la misma forma que en el apartado 4.3.1.

4.3.3. Ventilación forzada con carcasa y aletas

Generalmente la ventilación natural no es suficiente porque lo que en muchos casos es necesario instalar un ventilador que gira fijado al rotor y crea un corriente de aire sobre el motor. La velocidad del aire seleccionada suele estar entre 5 y 15m/s.

El coeficiente de convección para ventilación forzada es el siguiente:

- Carcasa

$$h = 3{,}89 \cdot \sqrt{\frac{v}{L_{carcasa}}}\ [W/m^2K] \qquad (146)$$

- Entrehierro

$$h = 3{,}89 \cdot \sqrt{\frac{v}{L_{rotor}}}\ [W/m^2K] \qquad (147)$$

Donde,

v: velocidad del viento [m/s]
$L_{carcasa}$: longitud de la carcasa [m]
L_{rotor}: longitud del rotor [m]

Una vez determinada la ventilación necesaria para el motor se puede elegir el aislamiento que el motor montará. Si la ventilación no fuera suficiente sería necesario modificar el diseño del motor.

4.4. Aislamiento térmico

Es necesario escoger un aislamiento térmico según las temperaturas que el motor alcance. La clasificación según los estándares de la IEC 60085 y IEC 60034-1 es:

Tabla 5. *Clases de aislamientos*

Classe	T. amb [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]
B	40	80	130
F	40	105	155
H	40	125	180

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Una vez finalizado el Trabajo Final de Grado se puede afirmar que se han conseguido los objetivos principales.

Se ha creado una pauta de cálculo mediante *Mathcad,* la cual ha sido muy útil para automatizar cálculos y encontrar resultados. Ha sido necesario consultar varias bases bibliográficas para crear la pauta y determinar parámetros claves para el diseño de motores.

También se han encontrado las curvas características del motor gracias a poder automatizar el programa *Mathcad*.

Los análisis magnéticos con FEMM han sido de gran ayuda para determinar las inducciones en distintos puntos del motor y así poder verificar que el motor no trabaja saturado. También la integración del lenguaje LUA ha ayudado a encontrar rápidamente las pérdidas en el acero del estator y del rotor.

El análisis térmico también ha sido satisfactorio ya que se ha conseguido un bajo calentamiento con la ayuda de una carcasa con aletas y ventilación forzada mediante un ventilador.

Todos los resultados y características se pueden ver en el Anexo 1.

CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA

6.1. Referencias Bibliográficas

Bargalló, Ramón. “Diseño de máquinas eléctricas”. UPC. Apuntes clase 2012.

Hoyos García, Juan José. “Bobinado de motores eléctricos de corriente alterna”. Apuntes y ejercicios. 20/04/2008

http://www.lavirtu.com/eniusimg/enius4/2009/38/adjuntos_fichero_408733.pdf

Miller, T.J.E . “ SPEED’s Electric Motors”. University of Glasgow, 2002.

6.2. Bibliografía de Consulta

Sawhney, A.K. and Dr. Chakrabarti, A. A course in “Electrical Machine Design”. Dhanpat Rai & CO. Reprint, 2010.

Veinott, Cyril g. “ Motores Eléctricos de Potencia Fraccionaria y Subfraccionaria”. Marcombo Boixareu Editores, 1978.





Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Anexo 1
Cálculo motor de 0,37kW

DISEÑO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

TFG presentado para optar al título de GRADO en INGENIERÍA ELÉCTRICA
por **Andrés Alonso Martín**

Barcelona, 11 de Junio de 2014

Director: Ramón Bargalló Perpiñà
Departamento de Ingeniería Eléctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: CÁLCULO ANALÍTICO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO DE 0,37KW

MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

Datos iniciales

Potencia, W $P := 370 \quad W$

Voltaje, V $V := 230 \quad V$

Frecuencia, Hz $f := 50 \quad Hz$

Velocidad síncrona, r.p.m $n_{syn} := 1500$

Velocidad síncrona, r.p.s $n_s := \frac{n_{syn}}{60}$ $\quad n_s = 25$

Par nominal, Nm $M := \frac{P}{n_{syn}} = 0.247$

Polos $p := 2 \cdot \left(\frac{f}{n_s}\right) = 4$

Eficiencia y factor de potencia		
Output watt	**Efficiency**	**Power factor**
37	0.38	0.46
90	0.48	0.51
180	0.57	0.56
370	0.65	0.62
750	0.69	0.65

$$Pot := \begin{pmatrix} 37 \\ 90 \\ 180 \\ 370 \\ 750 \end{pmatrix} \quad e := \begin{pmatrix} 0.38 \\ 0.48 \\ 0.57 \\ 0.65 \\ 0.69 \end{pmatrix} \quad PF := \begin{pmatrix} 0.46 \\ 0.51 \\ 0.56 \\ 0.62 \\ 0.65 \end{pmatrix}$$

$$\eta := linterp(Pot, e, P) = 0.65$$

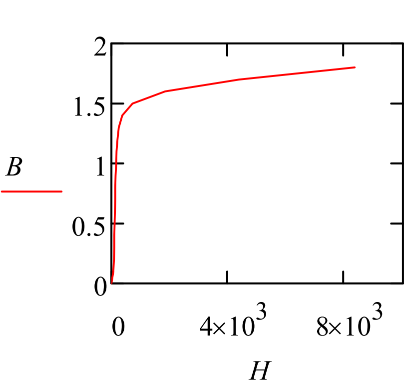
$$cos\phi := linterp(Pot, PF, P) = 0.62$$

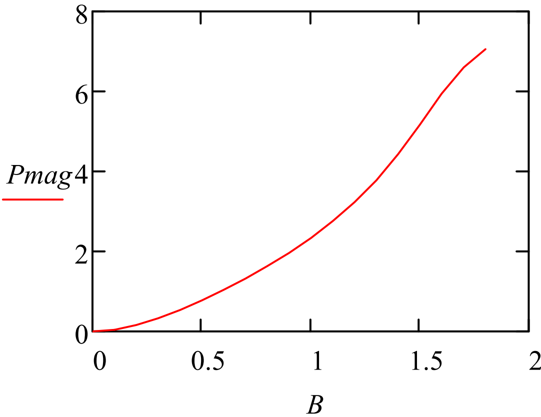
Rendimiento $\eta = 0.65$

cosϕ $cos\phi = 0.62$

Característica B(T) del material M600-50A
Característica Pfe(B) del material M600-50A
(W/kg a 50 Hz)

$$B := \begin{pmatrix} 0 \\ .1 \\ .2 \\ .3 \\ .4 \\ .5 \\ .6 \\ .7 \\ .8 \\ .9 \\ 1.0 \\ 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.4 \\ 1.5 \\ 1.6 \\ 1.7 \\ 1.8 \end{pmatrix} \quad H := \begin{pmatrix} 0 \\ 65.6 \\ 83.8 \\ 94.1 \\ 103 \\ 110 \\ 118 \\ 127 \\ 136 \\ 147 \\ 159 \\ 177 \\ 205 \\ 255 \\ 370 \\ 718 \\ 1840 \\ 4370 \\ 8330 \end{pmatrix} \quad Pmag := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.04 \\ .160 \\ .330 \\ .54 \\ .78 \\ 1.04 \\ 1.32 \\ 1.63 \\ 1.959 \\ 2.339 \\ 2.76 \\ 3.23 \\ 3.78 \\ 4.43 \\ 5.17 \\ 5.94 \\ 6.6 \\ 7.06 \end{pmatrix}$$





DISEÑO DEL ESTATOR

Class of machine	TRV kNm/m^3
Small totally-enclosed motors (Ferrite magnets)	7 - 14
Totally-enclosed motors (sintered Rare Earth or NdFeB magnets)	14 - 42
Totally-enclosed motors (Bonded NdFeB magnets)	20
Integral-hp industrial motors	7 - 30
High-performance servomotors	15 - 50
Aerospace machines	30 - 75
Large liquid-cooled machines (e.g. turbine-generators)	100 - 250

$$TRV := 7000$$

$$D2L := \frac{\frac{P\cdot 9.55}{n_{syn}}}{\frac{4}{\pi}TRV} = 2.643\times 10^{-4}$$

$$D2L = 2.643\times 10^{-4} \quad m^3$$

$$\tau = \frac{\pi\cdot 4}{p} \qquad \frac{L}{\tau} = 1$$

$$L = 1\cdot\left(\frac{\pi\cdot D}{p}\right) \rightarrow L = \frac{\pi\cdot D}{4}$$

$$\left(\frac{\pi}{p}\right)\cdot D^3 = D2L \qquad D^3 = D2L\cdot\left(\frac{p}{\pi}\right)$$

Diámetro del rotor

$$D := \sqrt[3]{D2L\cdot\left(\frac{p}{\pi}\right)} = 0.07 \quad m$$

Diámetro ajustado del rotor

$D := 66 \quad mm$ Diámetro de la chapa seleccionada

$$D := D\cdot 10^{-3} = 0.066 \quad m$$

Longitud del estator

$$L := \left(\frac{D2L}{D^2}\right)$$

$$L = 0.061 \ m$$

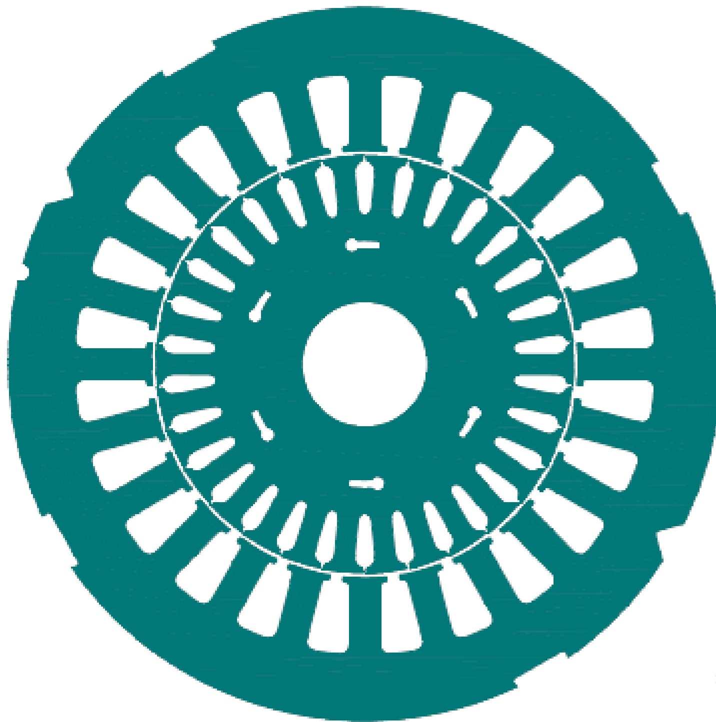
$$L_i := 0.95 \cdot L = 0.058 \ m$$

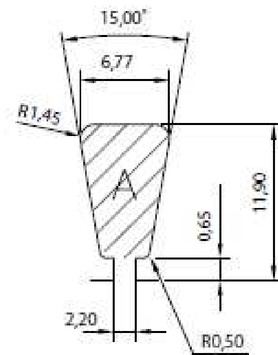
Paso polar

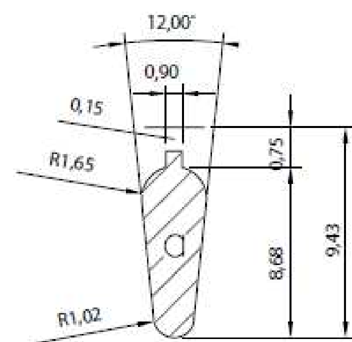
$$\tau := \frac{\pi \cdot D}{p}$$

$$\tau = 0.052 \ m$$

La chapa del estator seleccionada tiene $S_s := 24$ **ranuras**





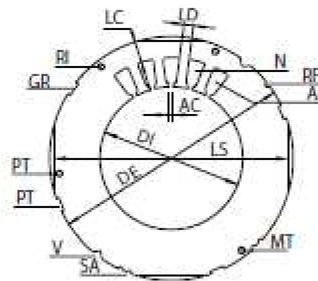


DE mm	DI mm	N	A mmq	LD mm	LC mm	LS mm	AC mm
110,00	66,00	24	62,85	4,60	10,10	0,00	2,20

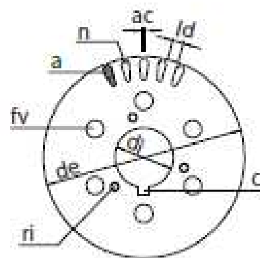
de mm	n	a mmq	ld mm	ac mm
66,00	30	22,70	3,10	0,90

#	RI	GR	SA	MT	PT	RF	V	$P_{1\,mm}$ g
4		✓				✓	✓	34,78
5		✓				✓		34,95

#	di mm	pz	c	l	fv	ri	$P_{1\,mm}$ g
1	20						18,93
2	22						18,18
3	17						19,38



LEGENDA STATORE - sezione A	
DE	Diametro esterno
DI	Diametro interno
N	Numero cave
A	Area cava
LD	Larghezza dente
LC	Larghezza corona
LS	Larghezza sfaccettatura
AC	Apertura cava
RI	Fori per rivetti
GR	Cave per graffe
SA	Cava per saldatura
MT	Foro per messa a terra
PT	Fori per passaggio tiranti
RF	Riferimento
V	Tacche a V
$P_{1\,mm}$	Peso indicativo g per 1 mm/sp.



LEGENDA ROTORE - sezione A	
de	Diametro esterno
di	Diametro interno
n	Numero cave
a	Area cava
ld	Larghezza dente
ac	Apertura cava
pz	Pozzetto
c	Scanalatura per chiavetta
l	Foro lobato
fv	Fori di ventilazione
ri	Fori per rivetti
$P_{1\,mm}$	Peso indicativo g per 1 mm/sp.

Paso de ranura del estator

$$y_{ss} := \frac{\pi \cdot D}{S_s}$$

$$y_{ss} = 8.639 \times 10^{-3} \quad m$$

Inducción por polo

Ancho de dientes del estator

$W_{ts} := 4.6 \times 10^{-3}$ m

Inducción por polo

$B_{ts} := 1.5$ $\frac{Wb}{m^2}$

$\Phi_m := B_{ts} \cdot \left(\frac{S_s}{p}\right) \cdot L_i \cdot W_{ts} = 2.386 \times 10^{-3}$ Wb

Comprovación

Diámetro exterior del estator

$D_o := 0.110$ m

Profundidad de la ranura del estator

$d_{ss} := 0.0119$ m

Profundidad del núcleo del estator

$$d_{sc} := \frac{\left[D_o - D - \left(2d_{ss}\right)\right]}{2}$$

$d_{sc} = 0.01$ m

Inducción en el núcleo del estator

$$B_{cs} := \frac{\Phi_m}{2L_i \cdot d_{sc}}$$

$B_{cs} = 2.05$ $\frac{Wb}{m^2}$ Valor máximo de 2.1 Wb/m2

Inducción en los dientes del estator

$$B_{ts} := \frac{\Phi_m}{\left(\frac{S_s}{p}\right) \cdot L_i \cdot W_{ts}} = 1.5 \quad \frac{Wb}{m^2}$$

Valor máximo de 2.1 Wb/m2

Devanado del estator (EXCEL ADJUNTO)

TIPO DE DEVANADO: Concéntrico

$$Ranuras_{polo} := \frac{S_s}{p}$$

Bobinas para $Ranuras_{polo} = 6$

Devanado			Se extiende por: (ranuras)
1	--	6	5
2	--	5	3

Vueltas necesarias en cada bobina:

Devanado			Operación	Vueltas
1	--	6	sin[(5/6) x 90]	0,966
2	--	5	sin[(3/6) x 90]	0,707
			TOTAL	1,673

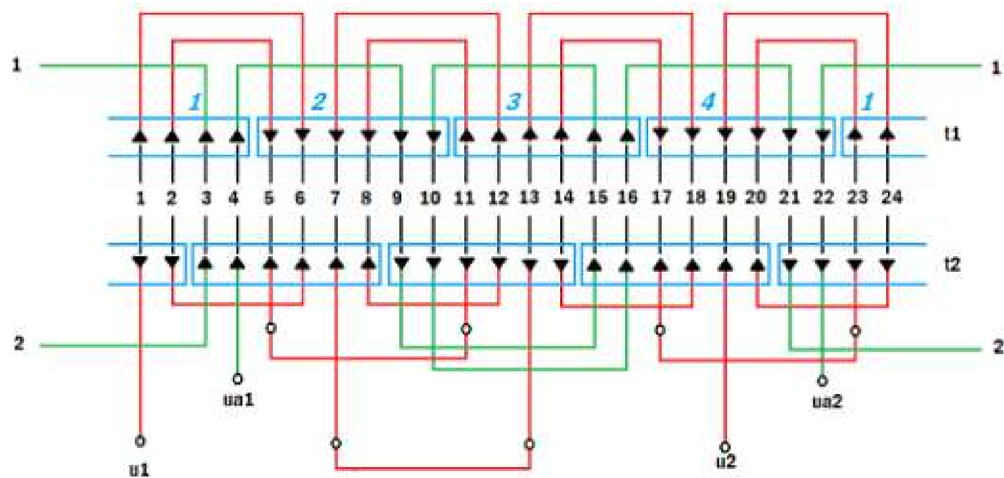
Porcentaje de vueltas por polo en la bobina

Bobina			Porcentaje
1	--	6	50,00
2	--	5	50,00
			100

Se escoje este porcentage para cumplir el factor de ocupación 0.4

Resumen

Bobina			Se estiende por: (ranuras)	Vueltas	Porcentaje
1	--	6	5	0,966	50,00
2	--	5	3	0,707	50,00
			TOTAL	1,707	100



Factor de bobinado

$$k_w = \frac{\%(1-6)\cdot Turns(1-6) + \%(2-5)\cdot Turns(2-5)}{Turns(1-6) + Turns(2-5)}$$

Kw= 0,837

$k_{wm} := 0.837$ Límites entre 0.75 y 0.85

Final cálculo con EXCEL

F.E.M inducida

$E := 0.95\cdot V = 218.5 \quad V$

Número de vueltas en serie en el devanado principal

$$T_m := \frac{E}{4.44\cdot k_{wm}\cdot f\cdot \Phi_m}$$

$T_m = 492.755$

$T_m = 492.755$

Número de vueltas en serie por polo

$$T_{pm} := \frac{T_m}{p}$$

$T_{pm} = 123.189$ $\quad T_{pm} := round(T_{pm})$

$T_{pm} = 123$

$T_m := T_{pm} \cdot p = 492$

Número de vueltas en cada devanado

Bobina			Se estiende por: (ranuras)	Vueltas	Porcentaje	Nº vueltas en cada devanado
1	--	6	5	0,966	50,00	62
2	--	5	3	0,707	50,00	62
			TOTAL	1,707	100	123

$Z_1 := 62$ $\quad Z_2 := 62$ $\quad Z_s := 62$ Número máximo de vueltas

Tamaño del conductor del debanado principal

$$I := \frac{P}{V \cdot \eta \cdot \cos\phi}$$ $\quad \delta_m := 10 \frac{A}{mm^2}$

$I = 3.992 \quad A$

$$a_{mo} := \frac{I}{\delta_m}$$

$a_{mo} = 0.399 \quad mm^2$

$$d_{11} := \sqrt{\frac{a_{mo} \cdot 4}{\pi}}$$

$d_{11} = 0.713$

Diameter/mm Rated	Grade 1/mm		Grade 2/mm		Diameter/mm Rated	Grade 1/mm		Grade 2/mm	
	Min. resin	Max. outer diameter	Min. resin	Max. outer diameter		Min. resin	Max. outer diameter	Min. resin	Max. outer diameter
0.200	0.014	0.226	0.027	0.239	1000	0.034	1062	0.063	1094
0.212	0.015	0.240	0.029	0.254	1060	0.034	1124	0.065	1157
0.224	0.015	0.252	0.029	0.266	1120	0.034	1184	0.065	1217
0.236	0.017	0.267	0.032	0.283	1180	0.035	1246	0.067	1279
0.250	0.017	0.281	0.032	0.297	1250	0.035	1316	0.067	1349
0.265	0.018	0.297	0.033	0.314	1320	0.036	1388	0.069	1422
0.280	0.018	0.312	0.033	0.329	1400	0.036	1468	0.069	1502
0.300	0.019	0.334	0.035	0.352	1500	0.038	1570	0.071	1606
0.315	0.019	0.349	0.035	0.367	1600	0.038	1670	0.071	1706
0.335	0.020	0.372	0.038	0.391	1700	0.039	1772	0.073	1809
0.355	0.020	0.392	0.038	0.411	1800	0.039	1872	0.073	1909
0.375	0.021	0.414	0.040	0.434	1900	0.040	1974	0.075	2012
0.400	0.021	0.439	0.040	0.459	2000	0.040	2074	0.075	2112
0.425	0.022	0.466	0.042	0.488	2120	0.041	2196	0.077	2235
0.450	0.022	0.491	0.042	0.513	2240	0.041	2316	0.077	2355
0.475	0.024	0.519	0.045	0.541	2360	0.042	2438	0.079	2478
0.500	0.024	0.544	0.045	0.566	2500	0.042	2578	0.079	2618
0.530	0.025	0.576	0.047	0.600	2650	0.043	2730	0.081	2772
0.560	0.025	0.606	0.047	0.630	2800	0.043	2880	0.081	2922
0.600	0.027	0.649	0.050	0.674	3000	0.045	3083	0.084	3126
0.630	0.027	0.679	0.050	0.704	3150	0.045	3233	0.084	3276
0.650	0.028	0.702	0.053	0.729	3350	0.046	3435	0.086	3479
0.670	0.028	0.722	0.053	0.749	3550	0.046	3635	0.086	3679
0.710	0.028	0.762	0.053	0.789	3750	0.047	3838	0.089	3883
0.750	0.030	0.805	0.056	0.834	4000	0.047	4088	0.089	4133
0.800	0.030	0.855	0.065	0.884	4250	0.049	4341	0.092	4387
0.850	0.032	0.909	0.060	0.939	4500	0.049	4591	0.092	4637
0.900	0.032	0.959	0.060	0.989	4750	0.050	4843	0.094	4891
0.950	0.034	1012	0.063	1044	5000	0.050	5093	0.094	5141

Diámetro del conductor desnudo

$d_{11} := 0.71 \quad mm$

Combinar valores para que se cumpla que el factor de ocupacion es <0.4

$$a_{11} := \left(\frac{d_{11}}{2}\right)^2 \cdot \pi \qquad a_{11} = 0.396 \quad mm^2$$

$$a_m := a_{11}$$

Área de la ranura

$a_z := 62.85 \quad mm^2$

Máximo número de bobinas conductoras principales en ranuras

$Z_s = 62$

Espacio ocupado por conductores

$$A_{c1} := Z_1 \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot d_{11}^{\,2} = 24.547$$

Relación entre el espacio ocupado por los conductores en la superficie total de ranura

$$\frac{A_{c1}}{a_z} = 0.391$$

Valor máximo permitdo es 0.4

Longitud media de vuelta

$$L_{ml} := \frac{8.4\left(D + d_{ss}\right)}{S_s} = 0.027 \quad m$$

Estos valores son introducidos en el EXCEL

$L = 0.061$ m

Bobina			Se estiende por: (ranuras)	Vueltas	Porcentaje	Nº vueltas en cada devanado	Longitud de media vuelta del devanado
1	--	6	5	0,966	50,00	62	0,257
2	--	5	3	0,707	50,00	62	0,203
			TOTAL	1,707	100	123	

$$L_{mtm} = \frac{n^o vueltas \cdot Longitud(1-6) + n^o vueltas \cdot Longitud(2-5)}{TOTAL Ln^o Vueltas}$$

$L_{mtm} := 0.23$ m

DEVANADO PRINCIPAL 24 RANURAS

Devanado			Se extiende por: (ranuras)
1	--	6	5
2	--	5	3

Devanado			Operación	Vueltas
1	--	6	sin[(5/6) x 90]	0,966
2	--	5	sin[(3/6) x 90]	0,707
			TOTAL	1,673

Bobina			Porcentaje
1	--	6	50,00
2	--	5	50,00
			100

Bobina			Se estiende por: (ranuras)	Vueltas	Porcentaje	Nº vueltas en cada devanado	Longitud media de vuelta del devanado
1	--	6	5	0,966	50,00	62	0,257
2	--	5	3	0,707	50,00	62	0,203
			TOTAL	1,707	100	123	

Lml	0,027
L	0,061
Lmin	0,230

averagecoilspan	4

Kw= 0,837	OK

DEVANADO DE ARRANQUE

Devanado de arranque			Se extiende	Operación	Vueltas	Porcentaje	Longitud media de vuelta del devanado
2	--	3	1	sin[(5/6) x 90]	0,966	185	47,55
				TOTAL	0,966	185	47,55

Kwa=	0,97
Lmta=	0,257

DISEÑO DEL ROTOR

Longitud del entrehierro

$$l_g := \left(\frac{0.007 \cdot D}{\sqrt{p}}\right) \cdot \frac{1}{10^{-3}} = 0.231 \quad mm$$

$$l_g := 0.25 \quad mm$$

Relación de diámetro

$$D_r := \frac{D}{10^{-3}} - (2 \cdot l_g)$$

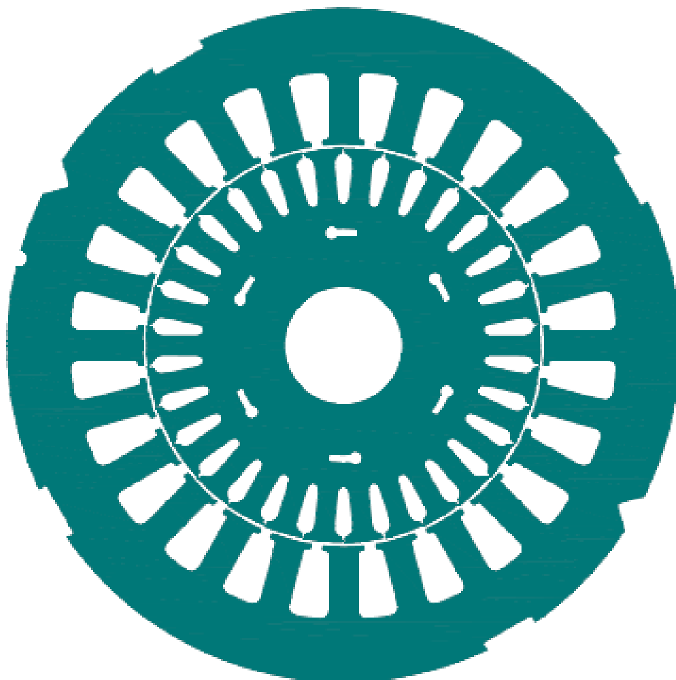
$$D_r = 65.5 \qquad mm$$

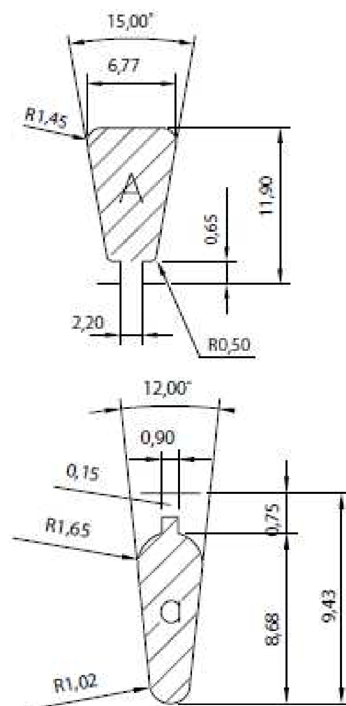
Número de ranuras del rotor

Número de ranuras del rotor debe ser aproximadol al número de ranuras del estator más dos veces el número de polos.

$$Ranurasaproximadas := S_s + (2 \cdot p) = 32$$

$$S_r := 30$$



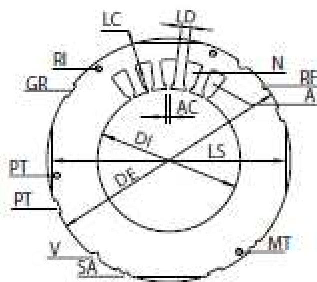


DE mm	DI mm	N	A mmq	LD mm	LC mm	LS mm	AC mm
110,00	66,00	24	62,85	4,60	10,10	0,00	2,20

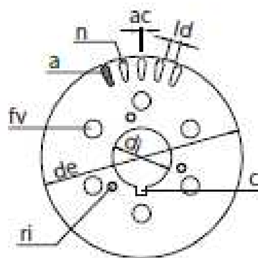
de mm	n	a mmq	ld mm	ac mm
66,00	30	22,70	3,10	0,90

#	RI	GR	SA	MT	PT	RF	V	$P_{1\,mm}$ g
4		✓				✓	✓	34,78
5		✓				✓		34,95

#	di mm	pz	c	l	fv	ri	$P_{1\,mm}$ g
1	20						18,93
2	22						18,18
3	17						19,38



LEGENDA STATORE - sezione A	
DE	Diametro esterno
DI	Diametro interno
N	Numero cave
A	Area cava
LD	Larghezza dente
LC	Larghezza corona
LS	Larghezza sfaccettatura
AC	Apertura cava
RI	Fori per rivetti
GR	Cave per graffe
SA	Cava per saldatura
MT	Foro per messa a terra
PT	Fori per passaggio tiranti
RF	Riferimento
V	Tacche a V
$P_{1\,mm}$	Peso indicativo g per 1 mm/sp.



LEGENDA ROTORE - sezione A	
de	Diametro esterno
di	Diametro interno
n	Numero cave
a	Area cava
ld	Larghezza dente
ac	Apertura cava
pz	Pozzetto
c	Scanalatura per chiavetta
l	Foro lobato
fv	Fori di ventilazione
ri	Fori per rivetti
$P_{1\,mm}$	Peso indicativo g per 1 mm/sp.

Barras del rotor

$a_b := 22.7 \quad mm^2$

Área total barras del rotor

$A_r := S_r \cdot a_b = 681 \qquad mm^2$

Final de anillos

$$a_{co} := \frac{0.32 \cdot A_r}{p} = 54.48 \quad mm^2$$

$d_c := 10 \quad mm$ — Ancho ranura del rotor + margen

$$t_c := \frac{a_{co}}{d_c} = 5.448$$

$t_c = 5.448 \quad mm$ — Espesor

$t_c := 5.5 \quad mm$ — Escoger espesor para que aco=ac

$$a_c := d_c \cdot t_c = 55 \quad mm^2$$

$D_{cro} := D_r = 65.5 \quad mm$ — Diámetro exterior del anillo

$D_{cri} := D_{cro} - 2d_c = 45.5 \quad mm$ — Diámetro interior del anillo

$$D_c := \frac{\left(D_{cro} - D_{cri}\right)}{2} + D_{cri} = 55.5 \quad mm$$ Diámetro medio

Profundidad de la ranura del rotor

$d_{sr} := 9.43 \quad mm$

Profundidad del núcleo del rotor

$D_{or} := 20 \quad mm$ — Diámetro del eje

$$d_{rc} := \frac{\left[D_r - D_{or} - \left(2d_{sr}\right)\right]}{2} = 13.32 \quad mm$$

Inducción en el núcleo del rotor

$$B_{cr} := \frac{\Phi_m \cdot 1000}{2L_i \cdot d_{rc}}$$

$$B_{cr} = 1.554 \quad \frac{Wb}{m^2}$$

Inducción en los dientes del rotor

$W_{trr} := 3.1 \cdot 10^{-3}$ m

$$B_{tr} := \frac{\Phi_m}{\left(\frac{S_r}{p}\right) \cdot L_i \cdot W_{trr}} = 1.781 \qquad \frac{Wb}{m^2}$$

$$B_{tr} = 1.781 \quad \frac{Wb}{m^2}$$

Factor de concentración de agujeros

$W_{os} := 2.2$ mm Abertura de la ranura del estator

Coeficiente de Carter para ranuras semi-cerradas

$$K_{os} := \frac{1}{1 + 5 \cdot \frac{l_g}{W_{os}}} = 0.638$$

$$K_{gss} := \frac{\left(y_{ss} \cdot 10^3\right)}{\left[\left(y_{ss} \cdot 10^3\right) - \left(K_{os} \cdot W_{os}\right)\right]} = 1.194$$

$W_{or} := 0.9$ mm

$$k_{cs} := \frac{1}{1 + \left(5 \cdot \frac{l_g}{W_{or}}\right)} = 0.419$$

$$y_{sr} := \frac{\pi \cdot D_r}{S_r} = 6.859 \quad mm$$

$$K_{gsr} := \frac{y_{sr}}{(y_{sr}) - (k_{cs} \cdot W_{or})} = 1.058$$

$$K_g := K_{gss} \cdot K_{gsr} = 1.263$$

Factor de saturación

Para motores monofasicos de inducción la saturación esta usualmente entre los valores 1.1 y 1.35

El factor de saturación Fs se asume como 1,15 para densidades de flujo en piezas de hierro que tienen valores pequeños.

$$F_s := 1.15$$

Resistencia de debanado principal

$$\rho_{75°C} := 0.021$$

$$\rho_{20°C} := 0.017$$

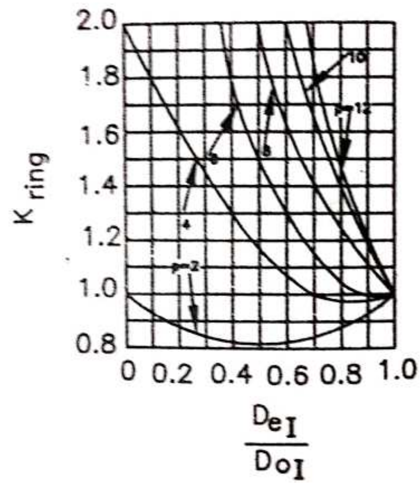
$$r_{smhot} := \rho_{75°C} \cdot \left(\frac{T_m \cdot L_{mtm}}{a_m} \right) = 6.002 \quad \Omega$$ para 75ºC

$$r_{smcold} := \rho_{20°C} \cdot \left(\frac{T_m \cdot L_{mtm}}{a_m} \right) = 4.859 \quad \Omega$$ para 20ºC

Resistencia del rotor

$$L_b := \left[\sqrt{(L)^2 + \left(y_{sr} \cdot 10^{-3} \right)^2} \right] \cdot 10^3 = 61.063 \quad mm$$ Longitud de cada barra

Relación $\frac{D_{cri}}{D_{cro}} = 0.695$



$k_{ring} := 1$

$\rho_{20°CAL} := \frac{1}{36}$ Aluminio

$\rho_{75°CAL} := \rho_{20°CAL} \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20}$

$$r_{rmhot} := 8 \cdot \left(T_m\right)^2 \cdot \left(k_{wm}\right)^2 \cdot \rho_{75°CAL} \cdot \left[\left[\frac{\left(L_b \cdot 10^{-3}\right)}{S_r \cdot a_b}\right] + \left[\frac{2 \cdot \left(D_c \cdot 10^{-3}\right) \cdot k_{ring}}{\pi \cdot (p)^2 \cdot a_c}\right]\right]$$

$r_{rmhot} = 5.947 \quad \Omega$ para 75ºC

$$r_{rmcold} := 8 \cdot \left(T_m\right)^2 \cdot \left(k_{wm}\right)^2 \cdot \rho_{20°CAL} \cdot \left[\left[\frac{\left(L_b \cdot 10^{-3}\right)}{S_r \cdot a_b}\right] + \left[\frac{2 \cdot \left(D_c \cdot 10^{-3}\right) \cdot k_{ring}}{\pi \cdot (p)^2 \cdot a_c}\right]\right]$$

$r_{rmcold} = 4.892 \quad \Omega$ para 20ºC

Reactancias

Reactancia de dispersión de ranura

$a_1 := 4.35$

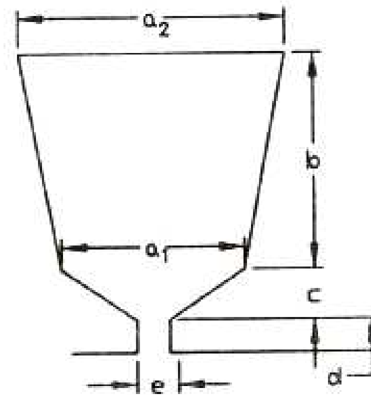
$a_2 := 6.7$

$b := 11.25$ $\quad 11.9 - 0.65 = 11.25$

$c := 0$

$d := 0.65$

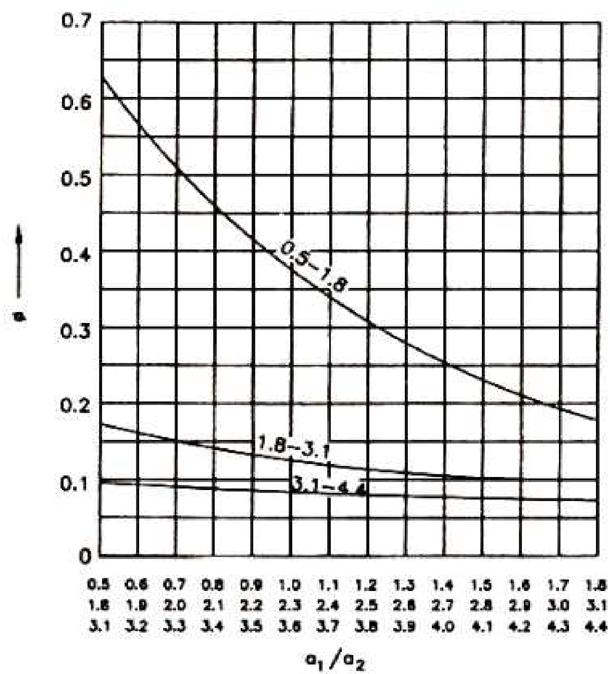
$e := 2.2$



Relaciones

$$\frac{b}{a_2} = 1.679$$

$$\frac{a_1}{a_2} = 0.649$$



Con esos radio les corresponde la siguiente Θ

$\Theta := 0.53$

$\mu_0 := 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$

$$\lambda_{ss} := \mu_0 \cdot \left[\left(\frac{\Theta \cdot b}{a_2} \right) + \left(\frac{d}{e} \right) + \left[2 \frac{c}{(e + a_1)} \right] \right] = 1.49 \times 10^{-6}$$

Permeabilidad específica para las ranuras del estator

$h_1 := 7$

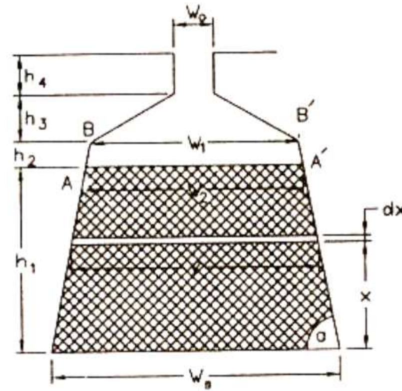
$h_2 := 0.5$

$h_3 := 1.17$

$h_4 := 0.75$

$W_s := 3.3$ $\qquad 1.65 \cdot 2 = 3.3$

$W_o := 0.9$



$$\lambda_{sr} := \mu_0 \cdot \left[\left(\frac{h_1}{3 \cdot W_s} \right) + \left(\frac{h_2}{W_s} \right) + \left(\frac{2h_3}{W_s + W_o} \right) + \left(\frac{h_4}{W_o} \right) \right]$$

Permeabilidad específica para las ranuras del rotor

$\lambda_{sr} = 2.826 \times 10^{-6}$

$$C_x := \left[\frac{Z_1{}^2 + Z_2{}^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right] \cdot \left(\frac{1}{k_{wm}{}^2} \right) \cdot \left(\frac{S_s}{4p} \right) = 1.071$$

$$x_{ss} := 16 \cdot \pi \cdot f \cdot (T_m \cdot k_{wm})^2 \cdot \frac{L \cdot \lambda_{ss} \cdot C_x}{S_s}$$

$$x_{sr} := 16 \cdot \pi \cdot f \cdot (T_m \cdot k_{wm})^2 \cdot \frac{L \cdot \lambda_{sr}}{S_r}$$

$x_s := x_{ss} + x_{sr} = 4.155$

Ranura de reactancia de dispersión en términos de devanado principal

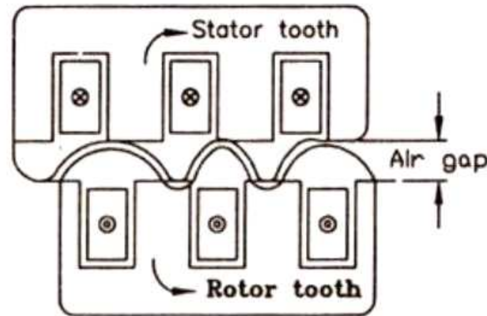
Reactancia de dispersión en ZigZag

$l_g = 0.25 \quad mm$ $\qquad y_{ss} = 8.639 \times 10^{-3} \quad m$

$W_{os} = 2.2 \quad mm$ $\qquad W_{tso} := \left(y_{ss} \cdot 10^3 - W_{os}\right) = 6.439 \quad mm$

$y_{sr} = 6.859 \quad mm$ $\qquad W_{tr} := y_{sr} - W_{or} = 5.959 \quad mm$

$W_{or} = 0.9$

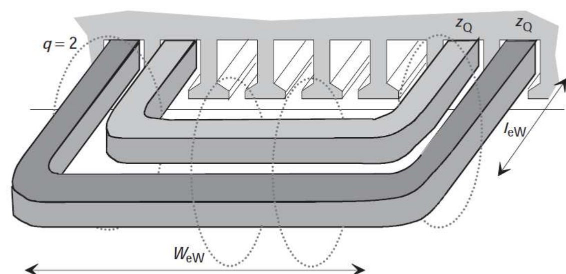


$$\lambda_z := \left[\frac{W_{tso} \cdot W_{tr} \cdot \left(W_{tso}^{\ 2} + W_{tr}^{\ 2}\right)}{12 \cdot l_g \cdot \left(y_{ss} \cdot 10^3\right)^2 y_{sr}} \right] \cdot \mu_0 = 2.417 \times 10^{-6}$$

$$x_z := 16 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(T_m \cdot k_{wm}\right)^2 \cdot \left(\frac{L}{S_s}\right) \lambda_z = 2.604 \qquad \Omega$$

Reactancia de dispersión en cabeza del devanado

$averagecoilspan := 4 \quad (EXCEL)$



$$x_0 := 16 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(T_m \cdot k_{wm}\right)^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot L}{6.4 \cdot S_s \cdot p} \cdot \left[\pi \cdot \left(D + d_{ss}\right) \cdot averagecoilspan\right] = 0.052 \qquad \Omega$$

Reactancia de magnetización

$F_s = 1.15$

$\tau = 0.052$

$$X_m := 16 \cdot \pi \cdot f \cdot (T_m \cdot k_{wm})^2 \cdot \left(\frac{\mu_0 \cdot L \cdot \tau}{10 \cdot l_g \cdot 10^{-3} \cdot K_g \cdot p \cdot F_s} \right) = 115.957 \quad \Omega$$

Reactancia de ranuras sesgadas

$$\theta_s := \left(\frac{\pi}{\frac{S_r}{p}} \right) \cdot \left(\frac{S_r}{S_s} \right) = 0.524 \quad radianes$$

$\theta_s = 0.524$

$$x_{sk} := X_m \cdot \left(\frac{\theta_s^{\,2}}{12} \right) = 2.649 \quad \Omega$$

Reactancia total de dispersión referida al estator

$x_s = 4.155 \ \Omega$ $\quad$ $x_z = 2.604 \ \Omega$ $\quad$ $x_0 = 0.052 \ \Omega$ $\quad$ $x_{sk} = 2.649 \ \Omega$

$$X_{lm} := x_s + x_z + x_0 + x_{sk} = 9.46 \quad \Omega$$ Reactancia de fuga total referida al estator

$$X_{om} := X_m + \left(\frac{X_{lm}}{2} \right) = 120.686 \quad \Omega$$ Reactancia del circuito abierto

$$K_r := \frac{(X_{om} - X_{lm})}{X_{om}} = 0.922$$ Factor de reactancia

$$K_i := \sqrt{K_r} = 0.96$$

Pérdidas en el núcleo

$\delta_{fe} := 7874 \ \frac{kg}{m^3}$

$m_{teeth} := S_s \cdot W_{ts} \cdot d_{ss} \cdot L_i \cdot \delta_{fe} = 0.596 \quad kg$ Peso de los dientes del estator

$B_{teeth} := \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot B_{ts} = 2.356 \ \frac{Wb}{m^2}$ Máxima inducción en los dientes del estator

$lossxkgteeth := linterp\left(B, Pmag, B_{teeth}\right) = 9.618 \quad \frac{W}{Kg}$

$Pteeth := m_{teeth} \cdot lossxkgteeth = 5.735 \quad W$ Las pérdidas de hierro en los dientes del estator

$D_{mainstator} := D_o - d_{sc} = 0.1 \quad m$ Diámetro del núcleo principal del estator

$m_{core} := \pi D_{mainstator} \cdot d_{sc} \cdot L_i \cdot \delta_{fe} = 1.439 \ kg$ Peso del núcleo del estator

$B_{cs} = 2.05 \ \frac{Wb}{m^2}$ Inducción en el nucleo

$lossxkgcore := linterp\left(B, Pmag, B_{cs}\right) = 8.208 \quad W$ Pérdidas por Kg en el núcleo

$Pcore := m_{core} \cdot lossxkgcore = 11.809 \quad W$ Pérdidas totales del hierro en el núcleo

Pérdida total de hierro debido a flujo de frecuencia fundamental

$P_{totaliron} := Pcore + Pteeth = 17.544 \quad W$

Pérdida total del núcleo es de aproximadamente 2,2 veces ya que el rotor ha cerrado las ranuras debido a que existe una considerable pérdida de superficie

$P_{losscore} := 2.2 \cdot P_{totaliron} = 38.597$

Fricción y resistencia al viento

$P_{FW} := 15 \ W$ Se asumen 15W

Constantes del motor (Método de Veinott)

$V = 230 \quad V$

$X_{lm} = 9.46 \quad \Omega$

$X_{om} = 120.686 \quad \Omega$

$r_{smhot} = 6.002 \quad \Omega$

$r_{rmhot} = 5.947 \quad \Omega$

$K_i = 0.96$

$P_{losscore} = 38.597 \quad W$

$P_{FW} = 15 \quad W$

$$I_m := \frac{V}{X_{om}} = 1.906 \quad A$$

$$F_1 := \left[2 - \left(K_i^2\right)\right] \cdot r_{rmhot} = 6.413$$

$$F_2 := \left[\left(2 \cdot r_{smhot}\right) + r_{rmhot}\right] \cdot \left(\frac{r_{rmhot}}{X_{om}}\right) = 0.885$$

$$F_3 := \left(I_m \cdot r_{rmhot}\right) \cdot \left(\frac{r_{rmhot}}{X_{om}}\right) = 0.559$$

$$F_4 := 2 \cdot I_m \cdot r_{rmhot} = 22.668$$

$$F_5 := \left(I_m \cdot r_{rmhot}\right) \cdot K_i = 10.881$$

$$F_6 := \left(I_m \cdot r_{rmhot} \cdot K_i\right)^2 \cdot r_{rmhot} = 704.124$$

$$F_7 := V \cdot K_i = 220.802$$

$$F_8 := \left(V \cdot K_i\right)^2 \cdot r_{rmhot} = 2.9 \times 10^5$$

$$F_9 := \frac{P_{losscore}}{2 \cdot V} = 0.084$$

$j := \sqrt{-1}$

$x := 0, 1 .. 120 \cdot \frac{f}{p}$ $\qquad p = 4$

$n_{syn} = 1.5 \times 10^{3}$ $\qquad 120 \cdot \frac{f}{p} = 1.5 \times 10^{3}$

$n_x := x$

$$s_x := \frac{n_{syn} - n_x}{n_{syn}} + 10^{-10}$$

1. $c_x := 1 - s_x = ...$

2. $U_x := \left[\left[1 - \left[(c_x)^2\right]\right] \cdot r_{rmhot}\right] + F_1 = ...$

3. $W_x := \left[\left[1 - (c_x)^2\right] \cdot X_{lm}\right] - F_2 = ...$

4. $M_x := \left[\left[1 - (c_x)^2\right] \cdot V\right] - F_3 = ...$

5. $N_x := M_x + \left(F_9 \cdot U_x\right) = ...$

6. $I_{1_x} := \frac{\left[\sqrt{(N_x)^2 + {F_4}^2}\right]}{\left[\sqrt{(U_x)^2 + (W_x)^2}\right]} = ...$

7. $I_{2_x} := \frac{\left[\sqrt{\left[\left[1 - (c_x)^2\right] \cdot F_7\right]^2 + (F_5)^2}\right]}{\left[\sqrt{(U_x)^2 + (W_x)^2}\right]} = ...$

8. $I_{3_x} := \frac{(c_x \cdot F_5)}{\sqrt{(U_x)^2 + (W_x)^2}} = ...$

9. $copperloss_{1_x} := \left[\left(I_{1_x}\right)^2\right] \cdot r_{smhot} = ...$

10. $copperloss_{2m_x} := \left[\left(I_{2_x}\right)^2\right] \cdot r_{rmhot} = ...$

11. $copperloss_{2s_x} := \left[\left(I_{3_x}\right)^2\right] \cdot r_{rmhot} = ...$

12. $coreloss_m := \frac{P_{losscore}}{2} = 19.298 \quad W$

$$Input_{1_x} := \left(copperloss_{1_x}\right) + \left(copperloss_{2m_x}\right) + \left(copperloss_{2s_x}\right) + \left(coreloss_m\right)$$

13. $Input_{2_x} := \left[\left[\left[\left[1 - \left(c_x\right)^2\right] \cdot F_8\right] - \left(F_6\right)\right] \cdot \left[\frac{\left(c_x\right)^2}{\left[\sqrt{\left(U_x\right)^2 + \left(W_x\right)^2}\right]^2}\right]\right]$

$$Input_x := Input_{1_x} + Input_{2_x} = ...$$

14. $Output_x := \left[\left[\left[1 - \left(c_x\right)^2\right] \cdot F_8\right] - \left(F_6\right)\right] \cdot \frac{\left(c_x\right)^2}{\left[\sqrt{\left(U_x\right)^2 + \left(W_x\right)^2}\right]^2}$

15. $RPM_x := c_x \cdot n_{syn} = ...$

16. $T_{main_x} := \left(\frac{60}{2 \cdot \pi}\right) \cdot \left(\frac{Output_x}{RPM_x}\right) = ...$

17. $Efficiency_x := \left(\frac{Output_x}{Input_x}\right) = ...$

18. $PF_x := \left(\frac{Input_x}{V \cdot I_{1_x}}\right) = ...$

$copperloss_{1_{1450}} = 96.018 \quad W$ — Pérdidas del cobre

$P_{alum} := copperloss_{2m_{1450}} + copperloss_{2s_{1450}} = 56.264 \quad W$ — Pérdidas del aluminio

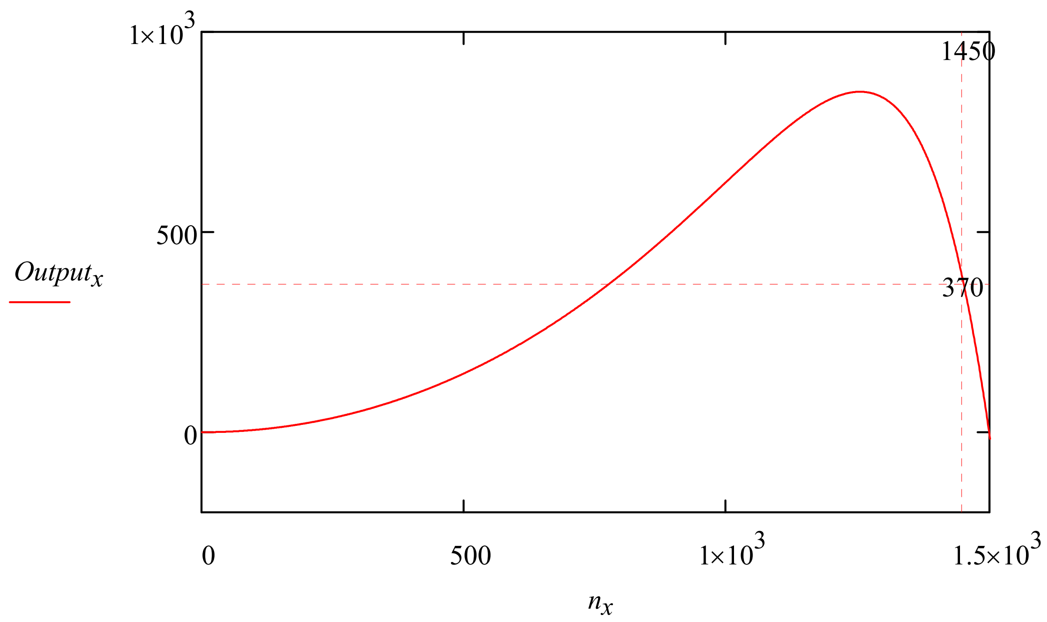
$Output_{1450} = 368.973 \quad W$ — Potencia nominal

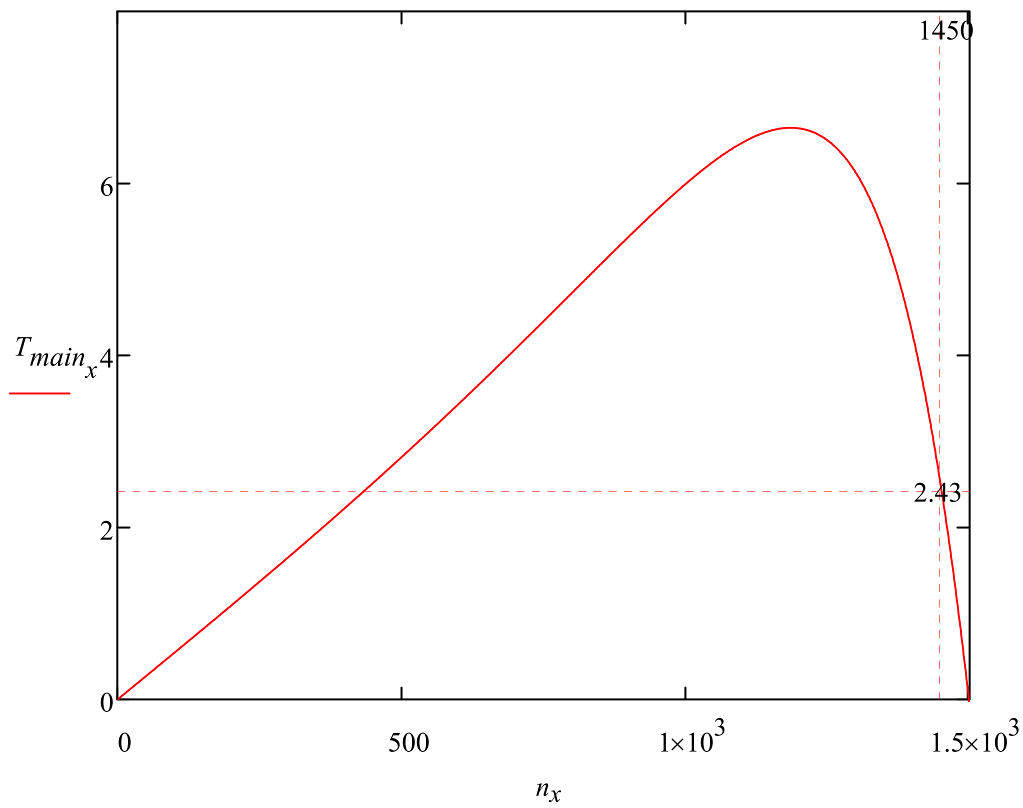
$T_{main_{1450}} = 2.43 \quad Nm$ — Par nominal

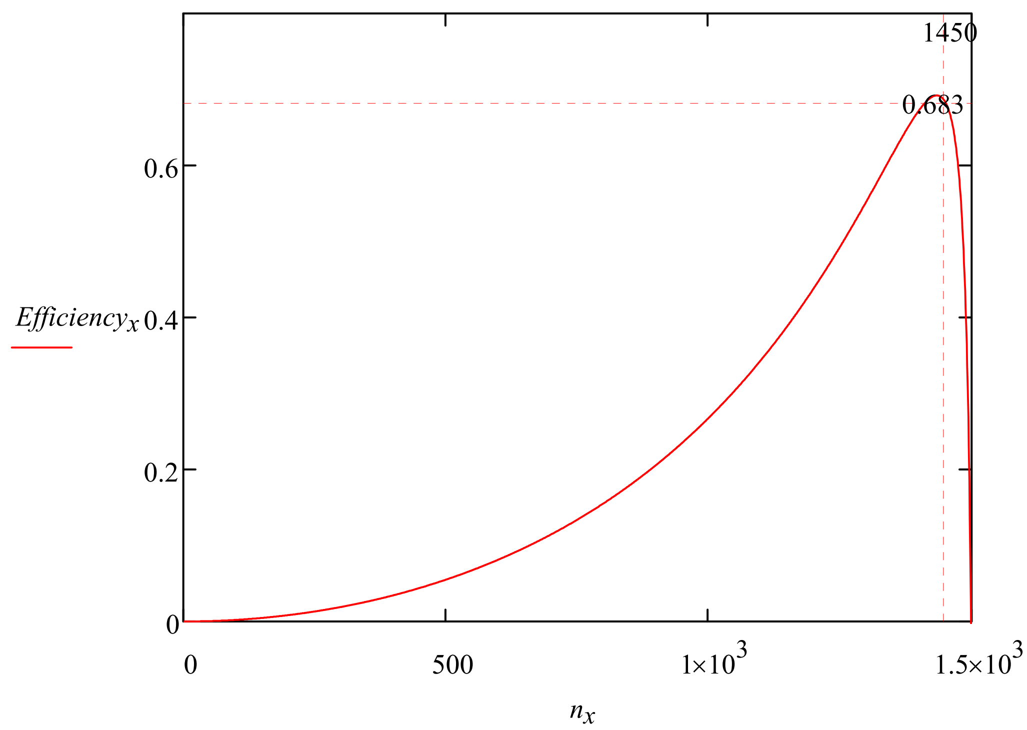
$Efficiency_{1450} = 0.683$ — Rendimiento

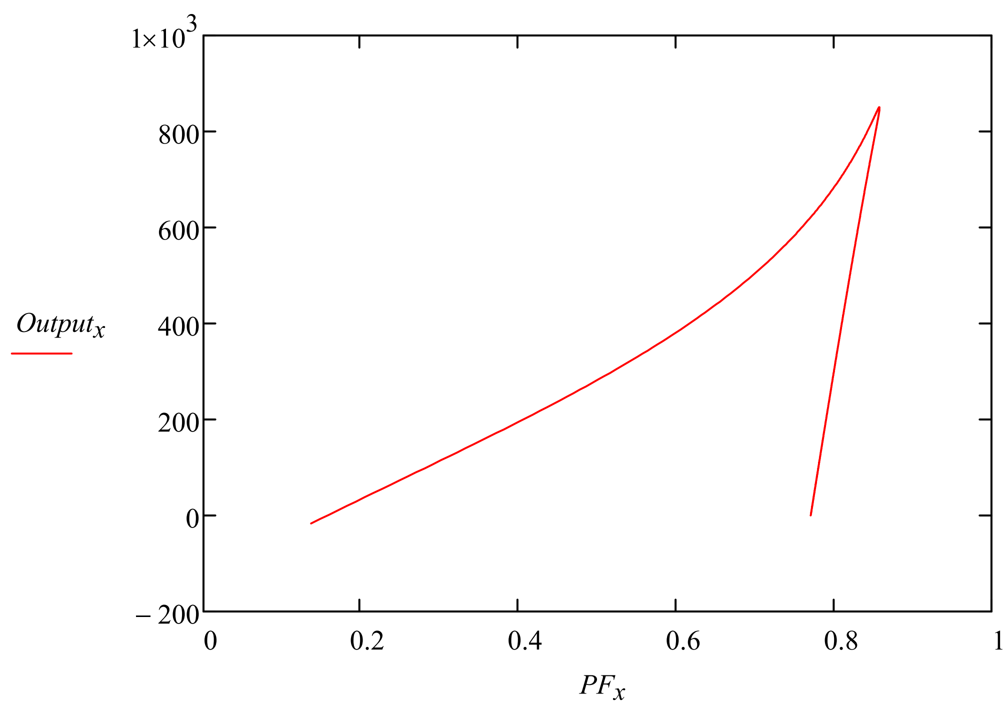
$I_{1_{1450}} = 4 \quad A$ — Corriente nominal

$PF_{1450} = 0.588$ Factor de potencia






1450
0.683
0.6
0.4
0.2
0
Efficiency_x
0
500
1×10^3
1.5×10^3
n_x


1×10^3
800
600
400
200
0
– 200
Output_x
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
PF_x

Diseño del devanado de arranque

$k_{wa} := 0.85$

(Valores a estimar)

$K := 1.53$

$$T_a := K \cdot T_m \cdot \left(\frac{k_{wm}}{k_{wa}}\right) = 741.247$$

Número de vueltas de devanado de arranque

$$T_{pa} := \frac{T_a}{p} = 185.312$$

$$T_{pa} := round(T_{pa}) = 185$$

EXCEL

Devanado de arranque			Se extiende	Operación	Vueltas	Porcentaje	Longitud de media vuelta del devanado
2	--	3	1	sin[(5/6) x 90]	0,966	185	47,55
				TOTAL	0,966	185	47,55

$Z_{1.1} := 185$

$T_{pa} := 185$

$$T_a := p \cdot T_{pa} = 740$$

$$L_{ml} := \frac{8.4(D + d_{ss})}{S_s} = 0.027 \quad m$$

Estos valores son introducidos en el EXCEL

$L = 0.061 \quad m$

$$k_{wa} = \frac{\%(2-3) \cdot Turns(2-3)}{Turns(2-3)}$$

Kwa=	0,97

$k_{wa} := 0.97$

$$K := \frac{T_a \cdot k_{wa}}{T_m \cdot k_{wm}} = 1.743$$

Área de los conductores

Se encuentran las secciones del devanado de arranque probando diferentes combinaciones

Diameter/ mm	Grade 1/mm		Grade 2/mm	
Rated	Min. resin	Max. outer diameter	Min. resin	Max. outer diameter
0.200	0.014	0.226	0.027	0.239
0.212	0.015	0.240	0.029	0.254
0.224	0.015	0.252	0.029	0.266
0.236	0.017	0.267	0.032	0.283
0.250	0.017	0.281	0.032	0.297
0.265	0.018	0.297	0.033	0.314
0.280	0.018	0.312	0.033	0.329
0.300	0.019	0.334	0.035	0.352
0.315	0.019	0.349	0.035	0.367
0.335	0.020	0.372	0.038	0.391
0.355	0.020	0.392	0.038	0.411
0.375	0.021	0.414	0.040	0.434
0.400	0.021	0.439	0.040	0.459
0.425	0.022	0.466	0.042	0.488
0.450	0.022	0.491	0.042	0.513
0.475	0.024	0.519	0.045	0.541
0.500	0.024	0.544	0.045	0.566
0.530	0.025	0.576	0.047	0.600
0.560	0.025	0.606	0.047	0.630
0.600	0.027	0.649	0.050	0.674
0.630	0.027	0.679	0.050	0.704
0.650	0.028	0.702	0.053	0.729
0.670	0.028	0.722	0.053	0.749
0.710	0.028	0.762	0.053	0.789
0.750	0.030	0.805	0.056	0.834
0.800	0.030	0.855	0.065	0.884
0.850	0.032	0.909	0.060	0.939
0.900	0.032	0.959	0.060	0.989
0.950	0.034	1012	0.063	1044

Diameter/ mm	Grade 1/mm		Grade 2/mm	
Rated	Min. resin	Max. outer diameter	Min. resin	Max. outer diameter
1000	0.034	1062	0.063	1094
1060	0.034	1124	0.065	1157
1120	0.034	1184	0.065	1217
1180	0.035	1246	0.067	1279
1250	0.035	1316	0.067	1349
1320	0.036	1388	0.069	1422
1400	0.036	1468	0.069	1502
1500	0.038	1570	0.071	1606
1600	0.038	1670	0.071	1706
1700	0.039	1772	0.073	1809
1800	0.039	1872	0.073	1909
1900	0.040	1974	0.075	2012
2000	0.040	2074	0.075	2112
2120	0.041	2196	0.077	2235
2240	0.041	2316	0.077	2355
2360	0.042	2438	0.079	2478
2500	0.042	2578	0.079	2618
2650	0.043	2730	0.081	2772
2800	0.043	2880	0.081	2922
3000	0.045	3083	0.084	3126
3150	0.045	3233	0.084	3276
3350	0.046	3435	0.086	3479
3550	0.046	3635	0.086	3679
3750	0.047	3838	0.089	3883
4000	0.047	4088	0.089	4133
4250	0.049	4341	0.092	4387
4500	0.049	4591	0.092	4637
4750	0.050	4843	0.094	4891
5000	0.050	5093	0.094	5141

Comprovación

$Z_{aux} := 185$

$$\frac{\left(\left(Z_{aux}\cdot\frac{\pi}{4}\cdot d_{aux}^{2}\right)\right)}{a_z} = 0.4$$

$$\left(Z_{aux}\cdot\frac{\pi}{4}\cdot d_{aux}^{2}\right) = 0.4\cdot a_z$$

$$Z_{aux} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{aux}^{\;2} = \frac{0.4 \cdot a_z}{1}$$

$$d_{aux}^{\;2} = \frac{0.4 \cdot a_z \cdot 4}{1 \cdot Z_{aux} \cdot \pi}$$

$$d_{aux} := \sqrt{\frac{0.4 \cdot a_z \cdot 4}{1 \cdot Z_{aux} \cdot \pi}} = 0.416 \quad mm$$

Diámetro máximo a seleccionar

$$d_{aux} := 0.4 \quad mm$$

Diámetro escogido

$$r_a := \frac{d_{aux}}{2}$$

$$a_a := \pi \cdot r_a^{\;2} = 0.126 \quad mm^2$$

Se coge del EXCEL

$$L_{m.ta} := \frac{47.55}{T_{pa}} = 0.257 \quad m$$

Longitud media de vuelta del bobinado de arranque

Resistencia del devanado de arranque

$$r_{sa} := \rho_{20°C} \cdot \left(\frac{T_a \cdot L_{m.ta}}{a_a} \right) = 25.731 \quad \Omega$$ para 20°C

$$r_{rm} := r_{rmcold} = 4.892 \quad \Omega$$

Resistencia total en términos de devanado principal

$$R_{sm} := r_{smcold} + r_{rm} = 9.751 \quad \Omega$$ para 20°C

Resistencia del rotor en función de devanado de arranque

$$r_{ra} := K^2 \cdot r_{rm} = 14.864 \quad \Omega$$ para 20°C

Resistencia total en términos de devanado de arranque

$$R_a := r_{sa} + r_{ra} = 40.594 \quad \Omega$$ para 20°C

Reactancia de fuga total en términos de devanado de arranque

$$X_{la} := K^2 \cdot X_{lm} = 28.741 \quad \Omega$$

Impedancia bloqueado el devanado principal

$$Z_m := \sqrt{(R_{sm})^2 + (X_{lm})^2} = 13.586 \quad \Omega$$

Reactancia capacitiva requerida para un par máximo de arranque

$$X_c := X_{la} + \left(\frac{R_a \cdot R_{sm}}{Z_m + X_{lm}} \right) = 45.918 \quad \Omega$$

$$C := \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = 69.322 \quad \mu F$$ Capacidad

Se selecciona un condensador de capacidad igual a:

CAPACITORES CAMPOS

Distribuidor de capacitores ELECOND

GUARDIA VIEJA 4095 (CP 1192) Ciudad Autónoma de Buenos Aires
Teléfono: 4862 0900 Teléfono y Fáx: 4864 3385

www.capacitorescampos.com.ar

110 Vca.	220 Vca.	330 Vca.
70 / 80 µf	70 / 80 µf	40 / 50 µf
80 / 100 µf	80 / 100 µf	50 / 60 µf
100 / 120 µf	100 / 120 µf	70 / 80 µf
120 / 140 µf	120 / 140 µf	80 / 100 µf
140 / 170 µf	140 / 170 µf	100 / 120 µf
170 / 200 µf	170 / 200 µf	100 / 120 µf
200 / 230 µf	200 / 230 µf	131 / 107 µf
230 / 260 µf	230 / 260 µf	140 / 170 µf
260 / 300 µf	260 / 300 µf	175 / 180 µf
300 / 350 µf	300 / 350 µf	
350 / 400 µf	350 / 400 µf	
380 / 420 µf	380 / 420 µf	
400 / 460 µf		
460 / 520 µf		
500 / 550 µf		
550 / 600 µf		
600 / 700 µf		
800 / 900 µf		
900 / 1000 µf		

110 Vca.	220 Vca.	330 Vca.
60 / 70 µf	60 / 70 µf	50 / 60 µf
70 / 90 µf	70 / 90 µf	70 / 90 µf
90 / 100 µf	90 / 100 µf	90 / 100 µf
100 / 120 µf	100 / 120 µf	100 / 120 µf
120 / 140 µf	120 / 140 µf	101 / 107µf
140 / 160 µf	140 / 160 µf	120 / 140µf
170 / 190 µf	170 / 190 µf	140 / 160 µf
190 / 210 µf	190 / 210 µf	170 / 190 µf
210 / 240 µf	210 / 240 µf	210 / 240 µf
240 / 270 µf	240 / 270 µf	
270 / 310 µf	270 / 310 µf	
320 / 360 µf	320 / 360 µf	
350 / 400 µf	350 / 400 µf	
380 / 420 µf	380 / 420 µf	
400 / 430 µf	400 / 430 µf	
450 / 500 µf	450 / 500 µf	
500 / 600 µf	500 / 600 µf	
600 / 700 µf		
700 / 800 µf		

$C := 70 \quad \mu F$

$$X_c := \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = 45.473 \quad \Omega$$

Impedancia de devanado de arranque con el condensador en serie

$$Z_a := \sqrt{(R_a)^2 + (X_{la} - X_c)^2} = 43.907 \quad \Omega$$

Corriente del rotor bloqueado en el devanado principal

$$I_{sm} := \frac{V}{Z_m} = 16.93 \quad A$$

Corriente del devanado de arranque con el rotor bloqueado

$$I_{sa} := \frac{V}{Z_a} = 5.238 \quad A$$

Densidad de corriente en el devanado de arranque

$$\delta_a := \frac{I_{sa}}{a_a} = 41.685 \quad \frac{A}{mm^2}$$

Corriente de rotor bloqueado para ambos arrollamientos en paralelo

$R_{sm} = 9.751$ $\quad X_{om} = 120.686$ $\quad X_{lm} = 9.46$

$R_a = 40.594$ $\quad r_{smhot} = 6.002$ $\quad X_{la} = 28.741$

$i := \sqrt{-1}$ $\quad r_{rmhot} = 5.947$ $\quad X_c = 45.473$

$$I_s := I_{sm} \cdot \frac{\left[R_{sm} + (X_{lm})i\right] + \left[R_a + (X_{la} - X_c) \cdot i\right]}{\left[R_a + (X_{la} - X_c) \cdot i\right]} = 19.016 + 4.805i \quad A$$

$$I_s := \left|\left|I_s\right|\right| = 19.614 \quad A$$

Par de arranque

$$C_r := \frac{K}{1 + \left(\frac{r_{rm}}{X_{om}}\right)^2} = 1.74$$

$$T_s := \left(\frac{1}{2\cdot\pi}\right)\cdot p\cdot C_r\cdot r_{rm}\cdot\frac{V^2}{f}\cdot\left[\frac{\left(R_a\cdot X_{lm}\right)-\left[R_{sm}\cdot\left(X_{la}-X_c\right)\right]}{\left(Z_m\right)^2\cdot\left(Z_a\right)^2}\right] = 8.818 \qquad Nm$$

$$\frac{T_s}{T_{main_{1450}}} = 3.629$$ Relación

Esta relacion está por encima del requisito mínimo del 300 por ciento

CAPÍTULO 2: CÁLCULO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

2.1. Dibujo de la chapa en CAD

La chapa seleccionada para el estator y el rotor es: SA110D y RA066D CPK del fabricante EURO TRANCIATURA. Es necesario pasar los planos que ofrece el fabricante a CAD para poder trabajar con FEMM.

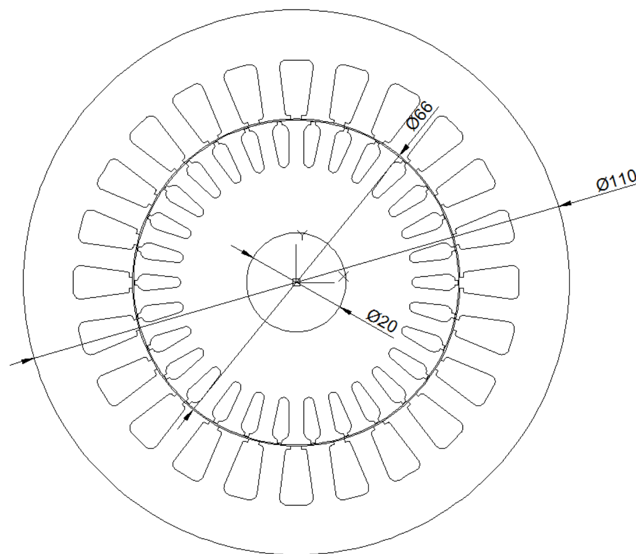


Figura 1. *Dibujo del rotor y el estator en CAD*

2.2. Configuración del problema

Se crea un nuevo problema magnético con FEMM:

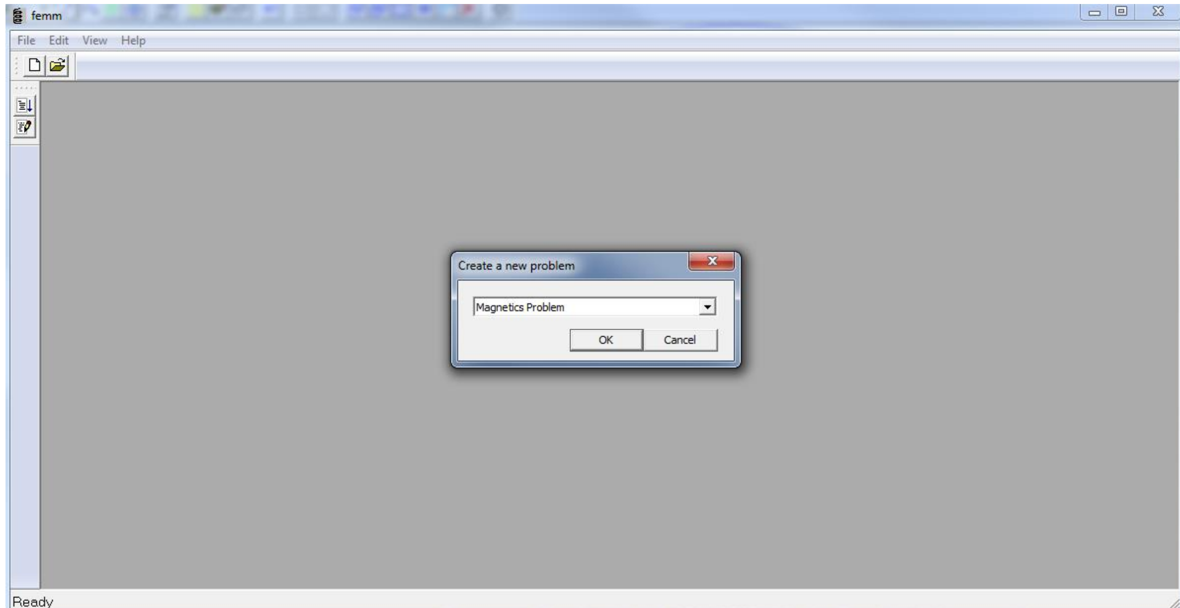


Figura 2. *Opción problema magnético*

A continuación se importa el archivo *.dxf* creado en CAD:

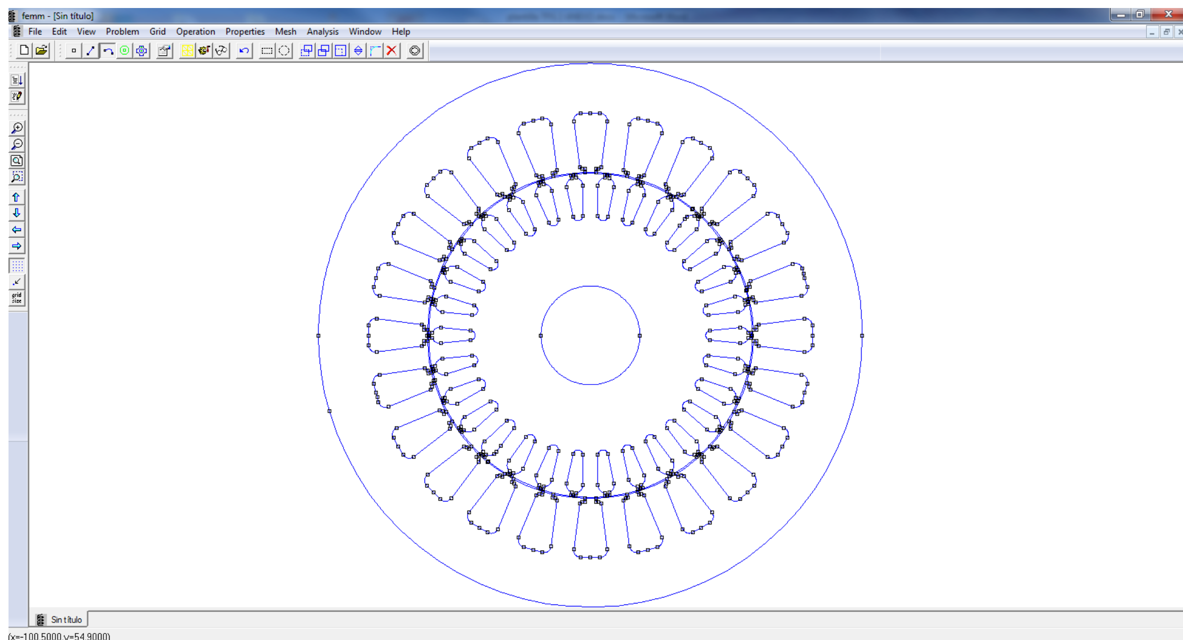


Figura 3. *Chapa importada a FEMM*

Posteriormente se define el problema abriendo la pestaña *problema*, y se establece frecuencia 0Hz, las unidades del dibujo y la profundidad del motor:

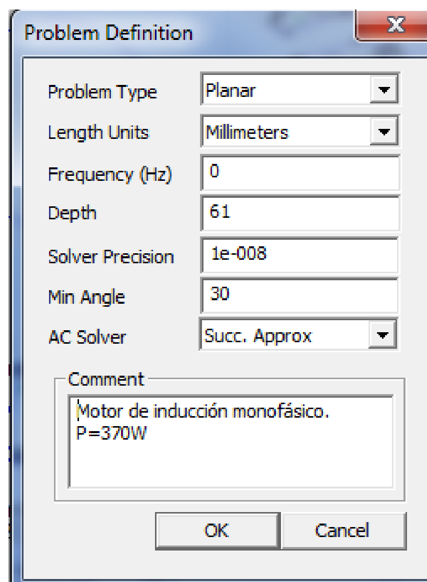


Figura 4. *Cuadro de definición del problema*

2.2.1. Definición de los materiales

En FEMM es necesario asignar un material a cada parte del dibujo. Existe una librería de materiales de la cual se pueden coger materiales e incluso modificar sus características o crear nuevos.

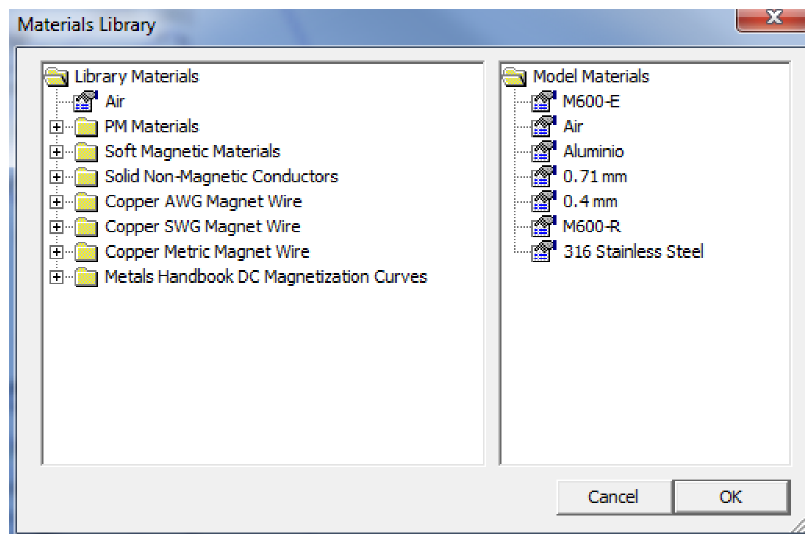


Figura 5. *Materiales seleccionados en la librería de FEMM*

- Aire:
  Se coge el aire de la librería y se aplica en el entrehierro. En la parte exterior del motor no hace falta ya que se aplica la condición de contorno en el diámetro exterior del estator.

Figura 6. *Propiedades del aire*

- Cobre:
  Se utiliza directamente el cobre seleccionado en la librería pero introduciendo el diámetro calculado en la pauta analítica. Diámetro de 0,71 mm para el devanado principal y diámetro de 0,4 mm para el devanado de arranque.

Figura 7. *Propiedades del cobre para el devanado principal*

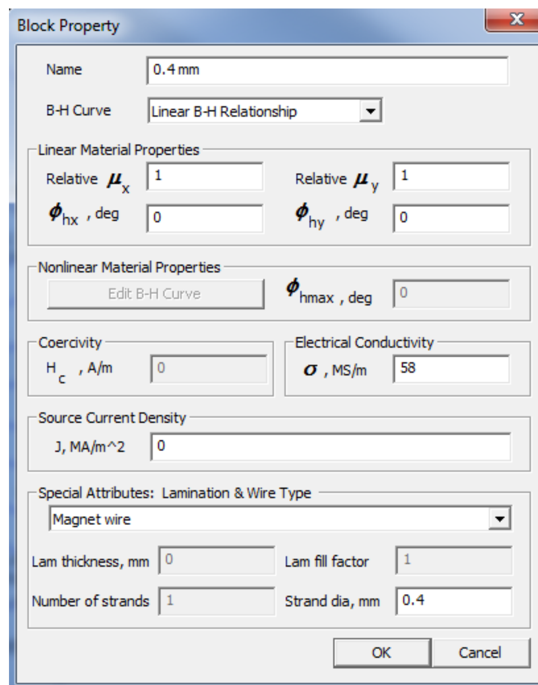


Figura 8. *Propiedades del cobre para el devanado de arranque*

- Acero M600-50:
  El estator y el rotor están formados por láminas de acero M600-50 apiladas una detrás de otra. El fabricante da la relación B-H del material y por lo tanto es necesario crear un nuevo material.
  El nuevo material creado es no lineal y se introducen los valores de B-H facilitados por el fabricante. También habrá que escoger la conductividad eléctrica y determinar que la chapa esta laminada en el plano y escoger el grosor de la chapa.

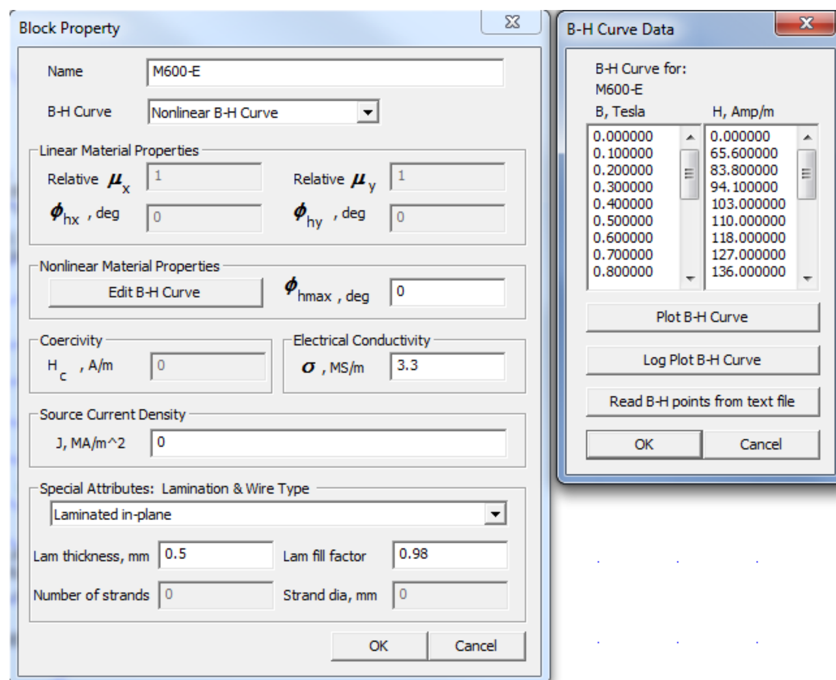


Figura 9. *Propiedades del acero M600-50*

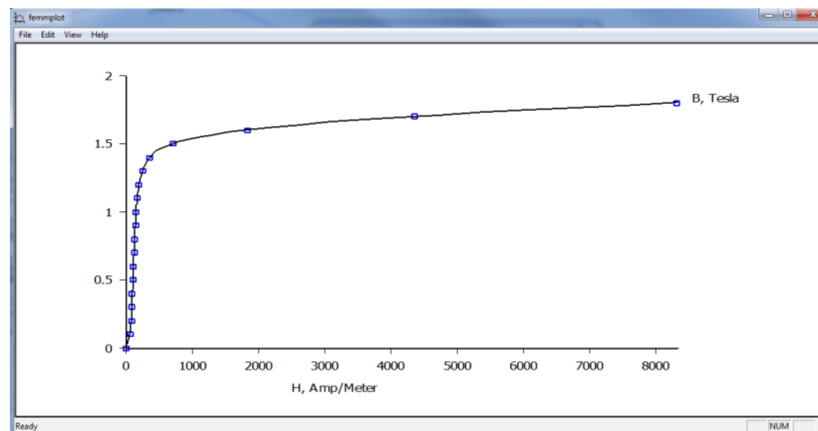


Figura 10. *Curva B-H característica del acero M600-50 a frecuencia 50Hz*

- Aluminio:
  El aluminio es inyectado en las ranuras del rotor.

Block Property

Name: Aluminio
B-H Curve: Linear B-H Relationship

Linear Material Properties
Relative μ_x: 1 — Relative μ_y: 1
ϕ_{hx}, deg: 0 — ϕ_{hy}, deg: 0

Nonlinear Material Properties
Edit B-H Curve — ϕ_{hmax}, deg: 0

Coercivity
H_c, A/m: 0

Electrical Conductivity
σ, MS/m: 36

Source Current Density
J, MA/m^2: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type
Not laminated or stranded
Lam thickness, mm: 0 — Lam fill factor: 1
Number of strands: 0 — Strand dia, mm: 0

OK — Cancel

Figura 11. *Propiedades del aluminio*

- Acero inoxidable:
  El acero inoxidable se selecciona directamente de la librería de FEMM y es utilizado en el eje del motor fijado al rotor.

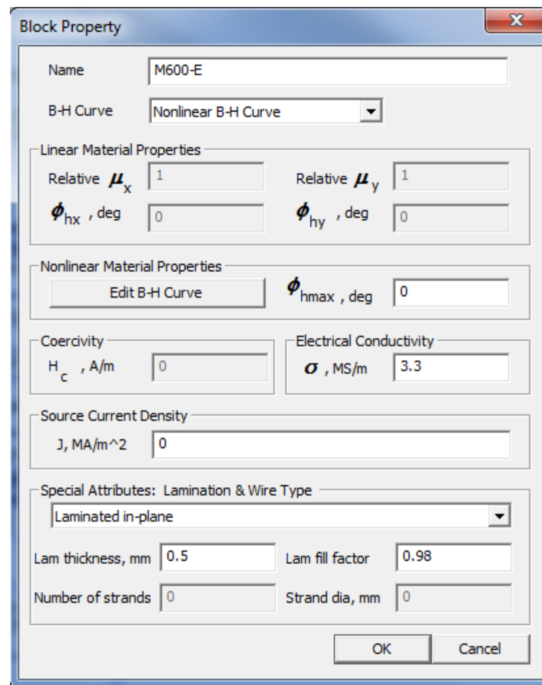


Figura 12. *Propiedades del acero inoxidable*

2.2.2. Definición devanados del estator

En cada ranura se determina el circuito, el número de conductores y el sentido de la corriente. En este caso se tienen dos circuitos, uno para el devanado principal y otro para el devanado de arranque.

En el devanado principal se pone la corriente de vacío y en el devanado de arranque corriente cero, ya que el motor se simula cuando el devanado de arranque se ha desconectado debido a que el motor ha llegado a su velocidad síncrona.

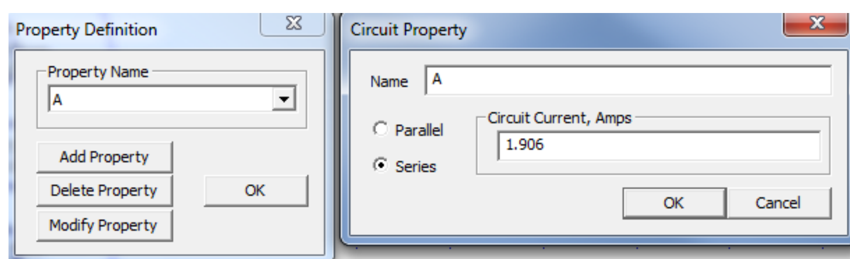


Figura 13. *Propiedades del devanado principal a corriente de vacío*

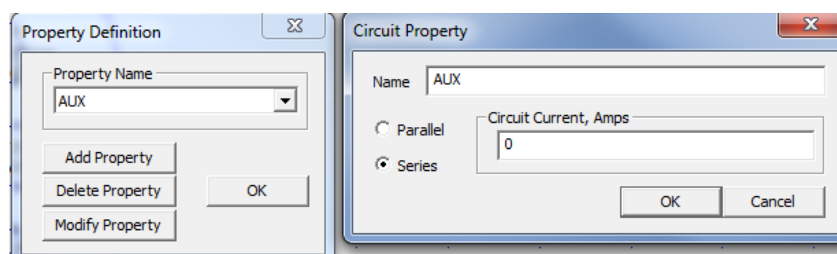


Figura 14. *Propiedades del devanado de arranque*

Después se asigna a cada ranura el material, el circuito, el número de conductores por ranura y el sentido de la corriente:

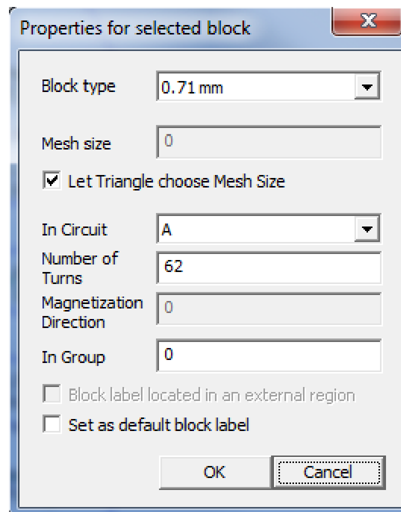


Figura 15. *Determinación de los conductores en las ranuras*

Es necesario asignar ranura por ranura los parámetros anteriores.

2.2.3. Condiciones de contorno

Se crea una condición de contorno llamada A=0 y se le aplican los parámetros *Prescribed A*. Esta condición será aplicada en todas las líneas externas del estator.

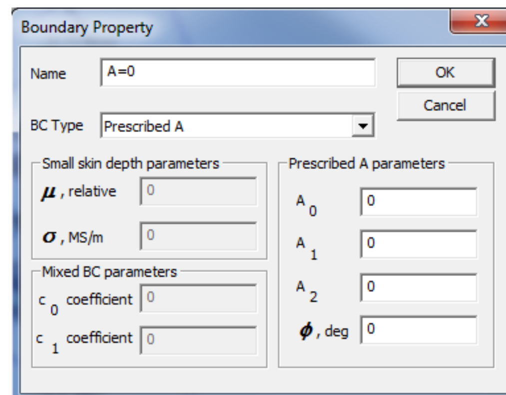


Figura 16. *Propiedades de contorno A=0*

2.3. Análisis magnéticos

2.3.1. Verificación de las inducciones

Una vez se tiene definido el motor en FEMM se hace un análisis electromagnético con la corriente de vacío para verificar que las inducciones están dentro de los limites.

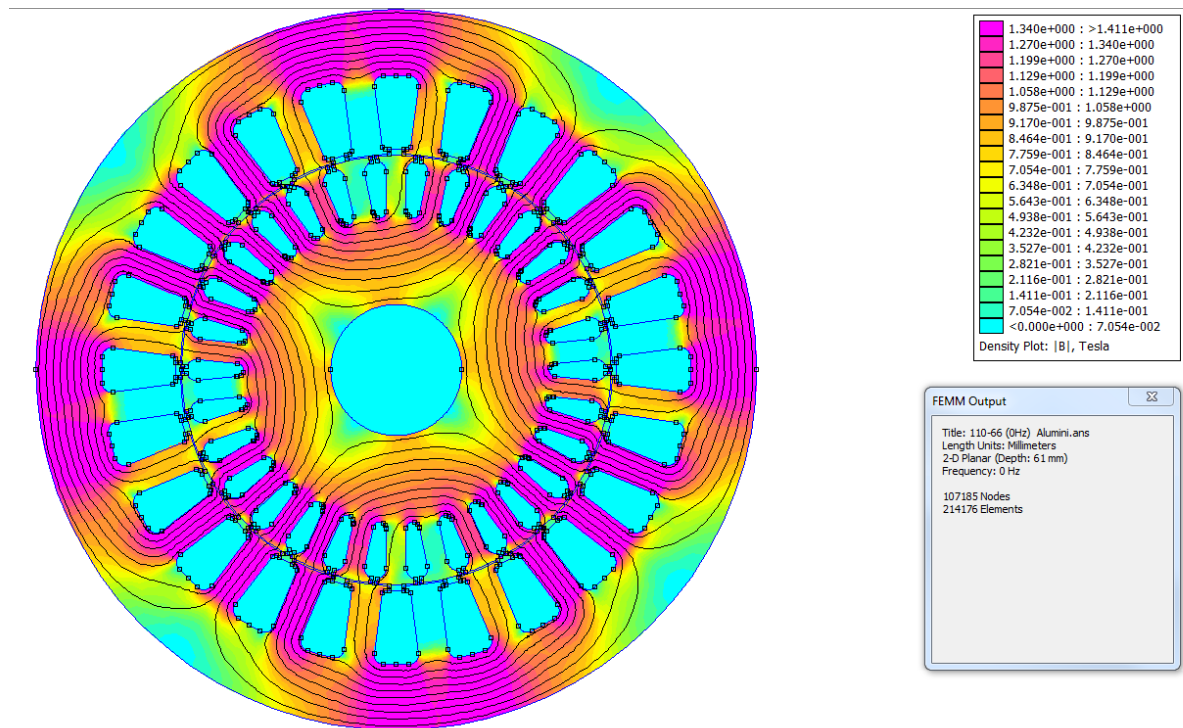


Figura 17. *Distribución de densidad de la inducción magnética*

Inducciones máximas:

- Dientes del estator: 1,80T
- Dientes del rotor: 1,70T
- Corona del estator: 1,46T
- Corona del rotor: 1,00T
- Entrehierro: 1,00T

Se verifica que todas las inducciones están por debajo de 2,1T

2.3.2. Cálculo de las pérdidas

Una vez simuladas las inducciones se abre el post-proceso y desde ahí la ventana *Open Lua Script.* Desde esta ventana se abre el programa LUA para encontrar las pérdidas del hierro en rotor y el estator.

Se asignan grupos a los materiales del estator y del rotor para que el programa LUA reconozca las regiones. También se asigna la frecuencia y la longitud del motor.

Se asigna grupo 1 al estator y grupo 2 al rotor:

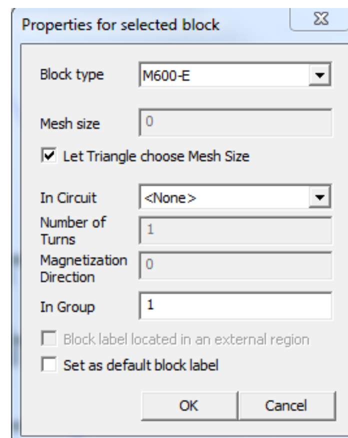


Figura 18. *Asignación del grupo 1 al estator*

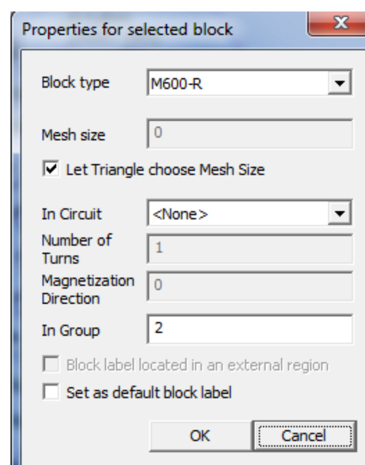


Figura 19. *Asignación del grupo 2 al rotor*

Es necesario saber los coeficientes de Bertotti para el acero M600-50:

- Kc=1,357
- Kh=216,83
- Ka=9,2184

El programa LUA es el siguiente:

```
showconsole()

mo_smooth("off")-- Suaviza el campo en casa pieza--
numelm = mo_numelements()

--ESTATOR
freq=50
depth=0.061
Pfe=0
Kc=1.357
Kh=216.83
```

```
Ka=9.2184
for k=1,numelm do
  p1,p2,p3,x,y,a,g=mo_getelement(k)
  if (g == 1) then ----------
    dv=depth*a*mm^2;
    a,bx,by,Sig,E,hx,hy=mo_getpointvalues(x,y)
    Bxmod=abs(bx)
    Bymod=abs(by)
    Bmod=sqrt(Bxmod^2+Bymod^2)
    Pfe=Pfe+(Kh*freq*Bmod^2+Kc*freq^2*Bmod^2+Ka*sqrt(freq^3*Bmod^3))*dv
  end
end
print(Pfe)

--ROTOR
freq=50
depth=0.061
Pfe=0
Kc=1.357
Kh=216.83
Ka=9.2184
for k=1,numelm do
  p1,p2,p3,x,y,a,g=mo_getelement(k)
  if (g == 2) then ----------
    dv=depth*a*mm^2;
    a,bx,by,Sig,E,hx,hy=mo_getpointvalues(x,y)
    Bxmod=abs(bx)
    Bymod=abs(by)
    Bmod=sqrt(Bxmod^2+Bymod^2)
    Pfe=Pfe+(Kh*freq*Bmod^2+Kc*freq^2*Bmod^2+Ka*sqrt(freq^3*Bmod^3))*dv
  end
end
print(Pfe)
```

Entonces el programa nos devuelve la siguiente respuesta:

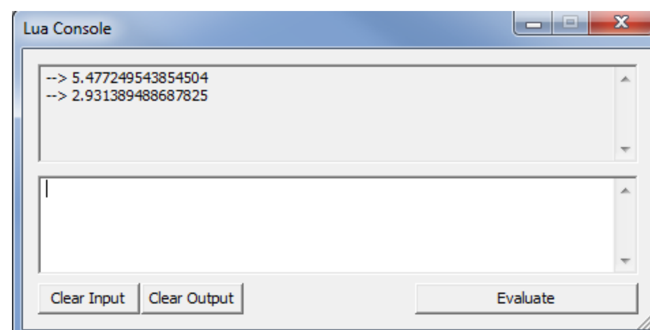


Figura 20. *Consola LUA con las pérdidas en el estator y el en rotor [W]*

$$P_{M600\text{-}50E}=5{,}48W$$

$$P_{M600\text{-}50R}=2{,}93W$$

Se encuentran las pérdidas del cobre con la opción de seleccionar áreas en el FEMM. Son seleccionadas todas las ranuras del estator y se ejecuta la integral *total losses*:

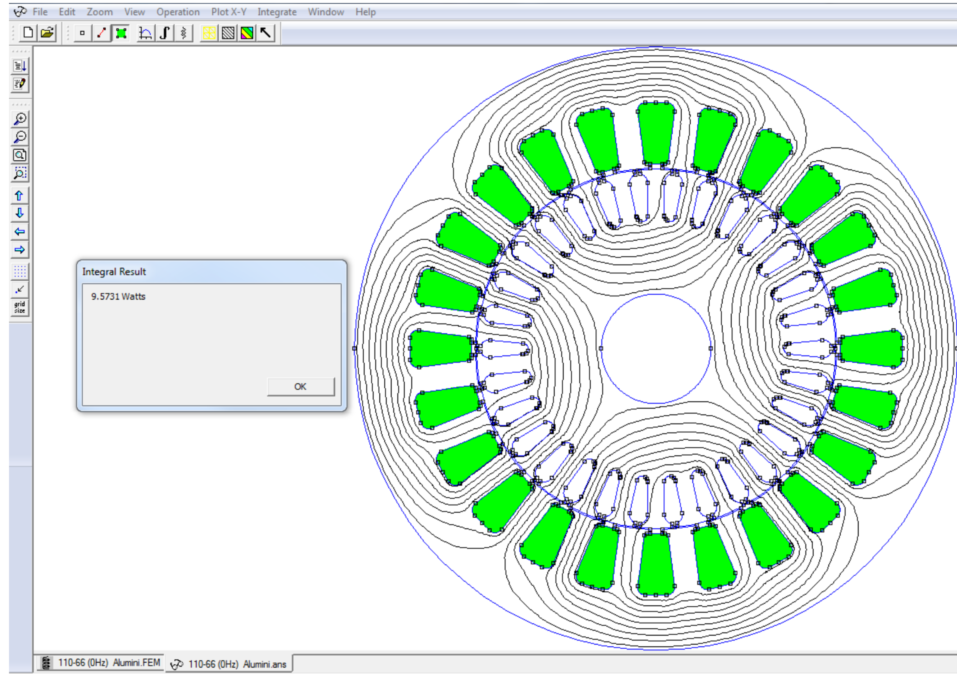


Figura 21. *Pérdidas del cobre con corriente en vacío en los devanados [W]*

P_0=9,57W

Estas pérdidas encontradas con FEMM son para la corriente en vacío 1,906A pero es necesario encontrarlas a corriente nominal de 4A. Se sabe que las pérdidas son directamente proporcionales al cuadrado del corriente a una misma temperatura:

$$P_0 = R \cdot {I^2}_0 \ [W] \quad (1)$$

$$9{,}57 = R \cdot 1{,}906^2 \Rightarrow R = 2{,}634 \ [\Omega] \quad (2)$$

Entonces las pérdidas del cobre a corriente nominal son:

$$P_n = 2{,}634 \cdot 4^2 = 42{,}15 \ [W] \quad (3)$$

Aun así FEMM no tiene en cuenta las cabezas de los devanados para encontrar las pérdidas del cobre, FEMM solo encuentra las pérdidas de 2L.

Teniendo en cuenta la longitud media de las espiras se puede encontrar las pérdidas totales del cobre de la siguiente manera:

$$\frac{P_n}{P_{cobre}} = \frac{2L}{L_{mtm}} \quad (4)$$

$$\frac{42{,}15}{P_{cobre}} = \frac{2 \cdot 0{,}061}{0{,}23} \quad (5)$$

$$P_{cobre} = 79{,}46 \ [W] \quad (6)$$

Donde,

P_n: pérdidas a corriente nominal encontradas con FEMM [W]

$2L$: dos veces la longitud de la maquina [m]

L_{mtm}: longitud media de las espiras [m]

P_{cobre}: pérdidas totales en el cobre a corriente nominal teniendo en cuenta las cabezas de los devanados [W]

Por último y también importantes, se encuentran las pérdidas en las barras de aluminio del rotor con la pauta analítica:

$$P_{alum} := copperloss_{2m_{1450}} + copperloss_{2s_{1450}} = 56.264 \quad [W] \tag{7}$$

Para el posterior análisis térmico con FEMM es necesario introducirle a FEMM la densidad de pérdidas de cada material. La densidad de pérdidas de cada material es la división de las pérdidas y el volumen del material [W/m^3].

Para encontrar el volumen de cada pieza se utiliza la herramienta de FEMM de selección de áreas y la integral de *Block volume*:

- Volumen del estator:

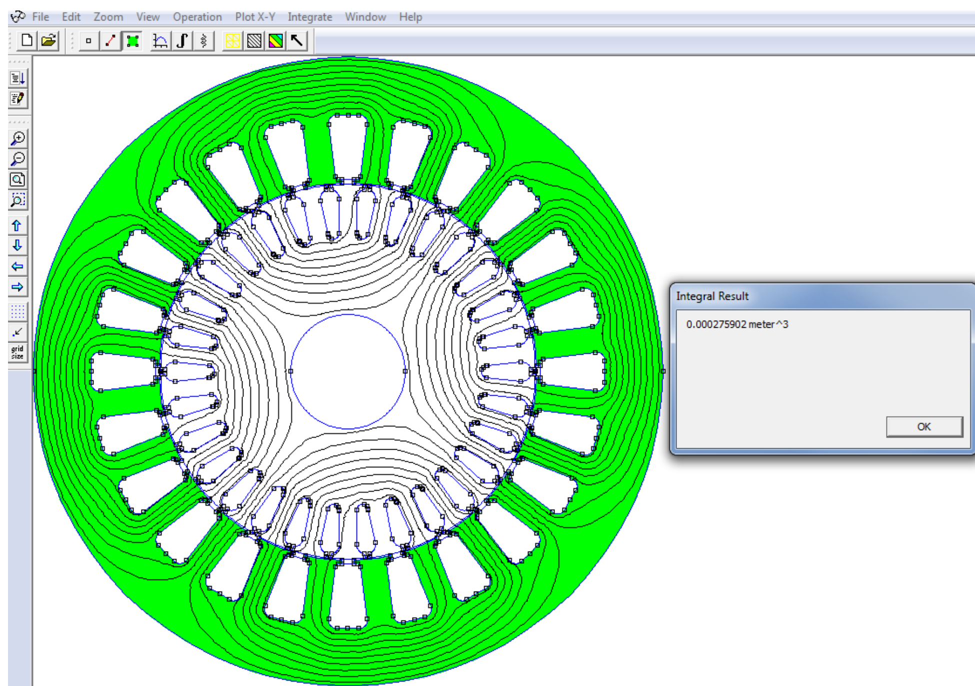


Figura 22. *Volumen del estator [m^3]*

$$V_{M600-50E} = 0{,}000275902\ [m^3] \tag{8}$$

- Volumen del rotor:

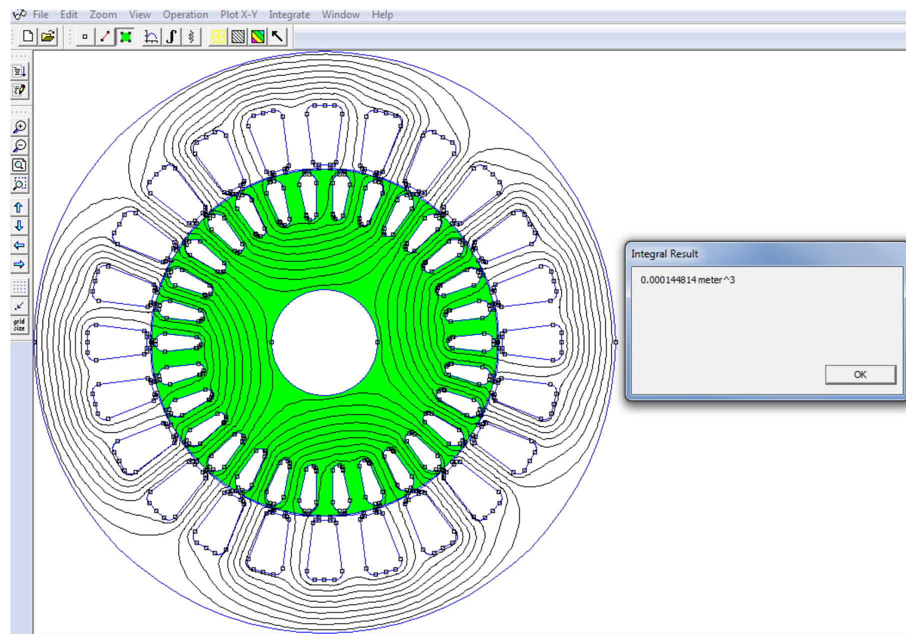


Figura 23. *Volumen del rotor [m³]*

$$V_{M600-50R} = 0{,}000144814\ [m^3] \tag{9}$$

- Volumen cobre (ranuras del estator):

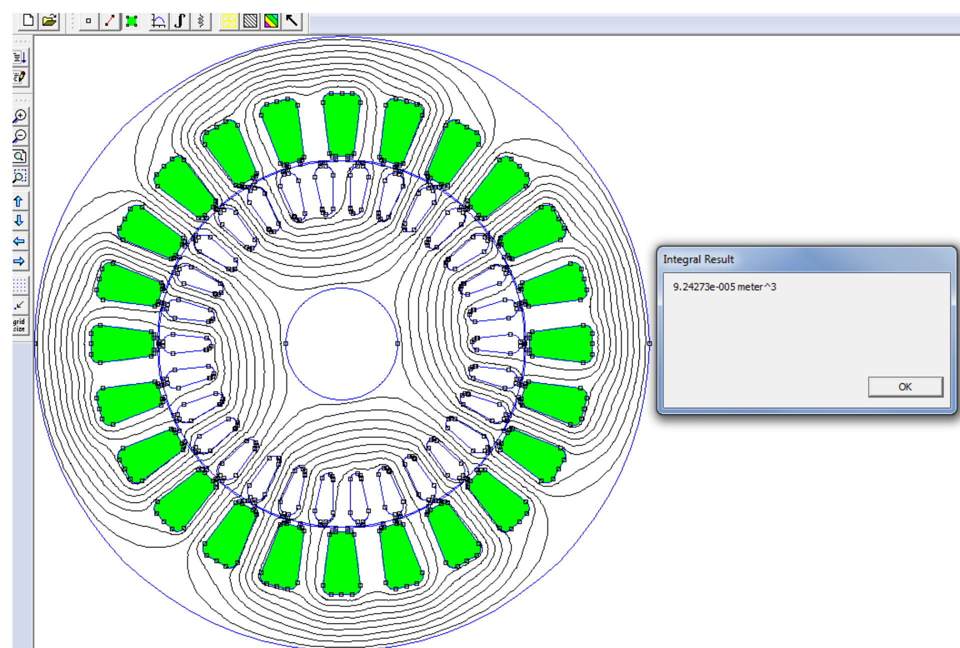


Figura 24. *Volumen del cobre [m³]*

$$V_{cobre} = 9{,}24273 \cdot 10^{-5}\ [m^3] \tag{10}$$

- Volumen aluminio (ranuras del rotor)

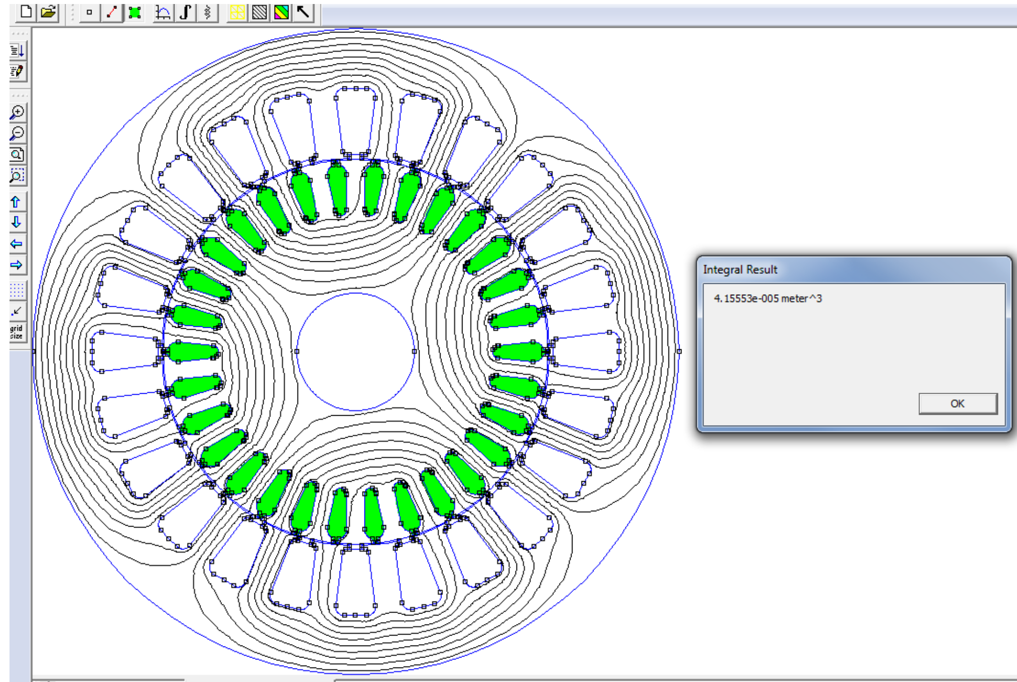


Figura 25. *Volumen del aluminio [m³]*

$$V_{alum} = 4{,}15553 \cdot 10^{-5}\ [m^3] \tag{11}$$

Las densidades son:

$$Densidad_{M600-50E} = \frac{P_{M600-50E}}{V_{M600-50E}} = \frac{5{,}48}{0{,}000275902} = 1{,}986 \cdot 10^4\ [W/m^3] \tag{12}$$

$$Densidad_{M600-50R} = \frac{P_{M600-50R}}{V_{M600-50R}} = \frac{2{,}93}{0{,}000144814} = 2{,}023 \cdot 10^4\ [W/m^3] \tag{13}$$

$$Densidad_{cobre} = \frac{P_{cobre}}{V_{cobre}} = \frac{79{,}46}{9{,}24273 \cdot 10^{-5}} = 8{,}597 \cdot 10^5\ [W/m^3] \tag{14}$$

$$Densidad_{aluminio} = \frac{P_{aluminio}}{V_{aluminio}} = \frac{56{,}26}{4{,}15553 \cdot 10^{-5}} = 1{,}354 \cdot 10^6\ [W/m^3] \tag{15}$$

CAPÍTULO 3: CÁLCULO TÉRMICO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

3.1. Dibujo en FEMM con CAD

Para realizar el análisis térmico es necesario crear un nuevo archivo en FEMM (*Heat Flow Problem)* y hará falta volver a importar el archivo *.dxf* de la chapa seleccionada dibujada en CAD. En este caso es necesario añadir un recubrimiento aislante en las paredes interiores de las ranuras. Un valor típico de aislamiento es el 0.25mm.

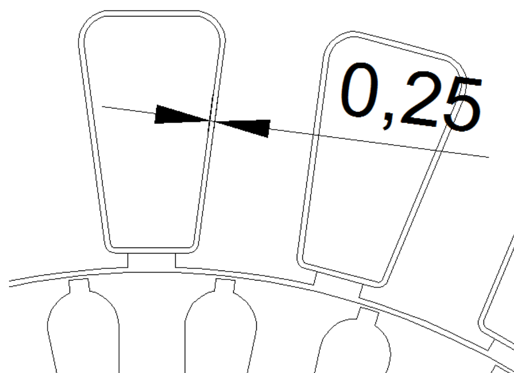


Figura 26. *Aislamiento de 0,25 mm en ranuras del estator*

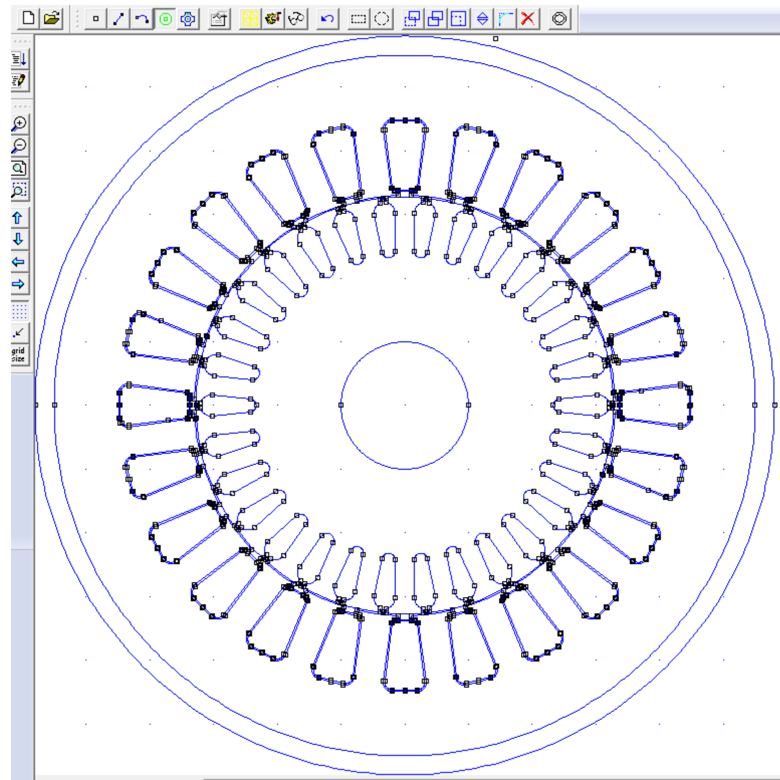


Figura 27. *Motor con aislante en ranuras y carcasa exterior de 3mm*

3.2. Definición de los materiales

Se utilizan los mismos materiales que en la simulación magnética pero añadiendo el *Kapok* (aislante en ranuras) y un nuevo aluminio para la carcasa.

Los materiales se definen de la siguiente manera

- Aire: el aire se encuentra en el entrehierro. Su conductividad térmica depende de la temperatura.

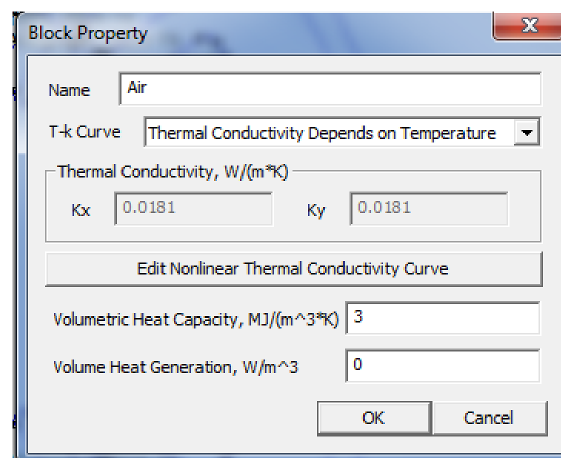


Figura 28. *Propiedades térmicas del aire*

- Cobre: el cobre se encuentra situado en los devanados de las ranuras del estator. La conductividad térmica depende de la temperatura.
  Se introduce la densidad de pérdidas encontrada en el apartado 2.3.2:

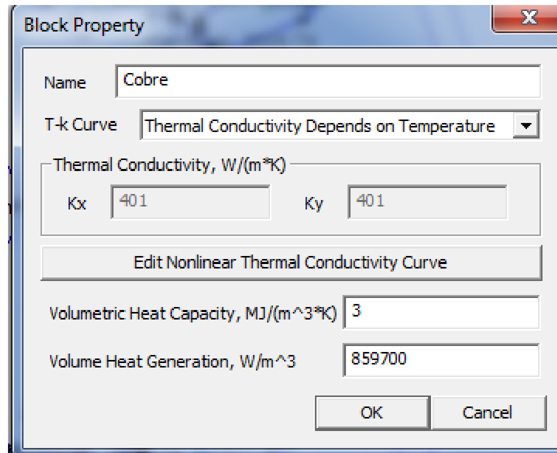


Figura 29. *Propiedades térmicas del cobre*

- Acero M600-50: el acero se encuentra en el estator y el rotor. Su conductividad térmica depende de la temperatura.
  Se introduce la densidad de pérdidas encontrada en el apartado 2.3.2:

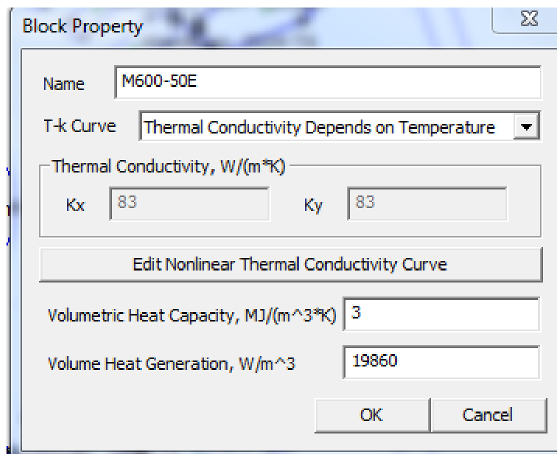


Figura 30. *Propiedades térmicas del acero en el estator*

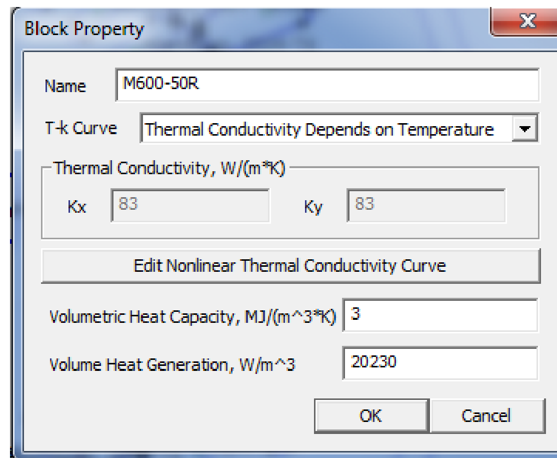


Figura 31. *Propiedades térmicas del acero en el rotor*

- Aluminio: se encuentra en las barras del rotor. Su conductividad térmica depende de la temperatura.
  Se introduce la densidad de pérdidas encontrada en el apartado 2.3.2:

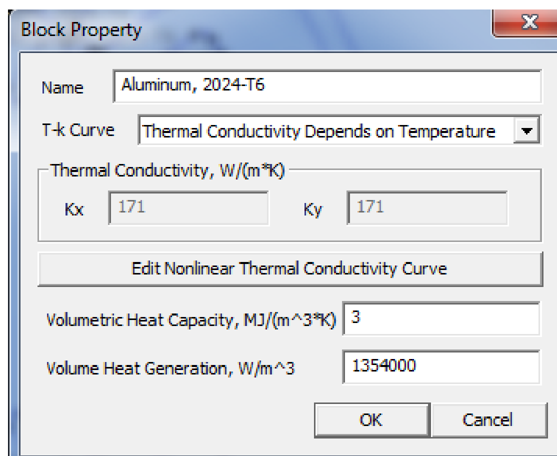


Figura 32. *Propiedades térmicas del aluminio de las barras del rotor*

- Acero inoxidable: utilizado en el eje. Es acero *316 Stainless Steel*. Su conductividad depende de la temperatura.

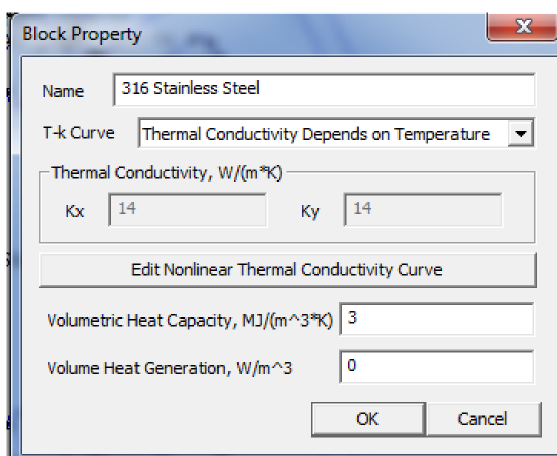


Figura 33. *Propiedades térmicas del acero inoxidable*

- Kapok: aislante que separa el devanado de las ranuras del estator. Su conductividad térmica es constante.

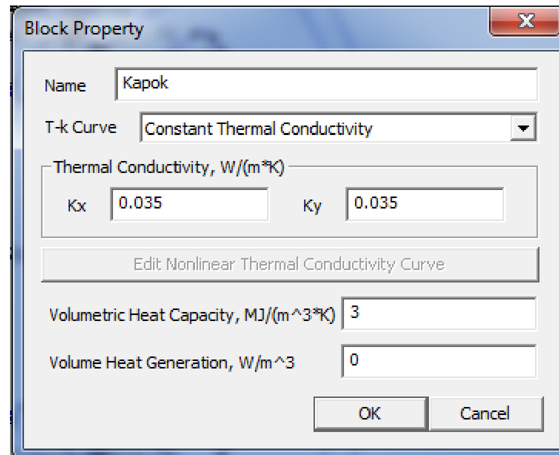


Figura 34. *Propiedades térmicas del Kapok*

- Aluminio de la carcasa: es el mismo aluminio que el de las barras del rotor pero no presenta pérdidas. Su conductividad térmica depende de la temperatura:

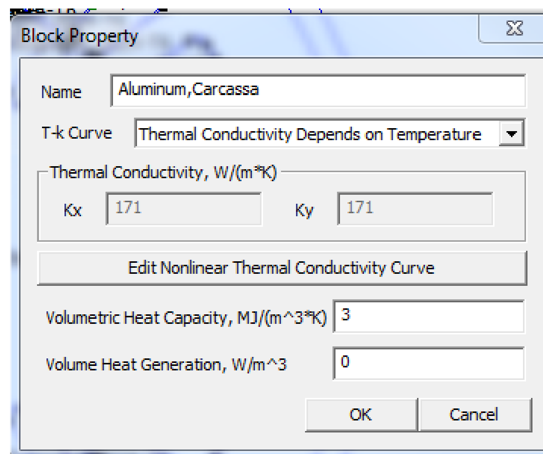


Figura 35. *Propiedades térmicas del aluminio de la carcasa*

Tal y como se hace en la simulación magnética, una vez definidos los materiales toca asignarlos a cada parte del motor que les corresponda.

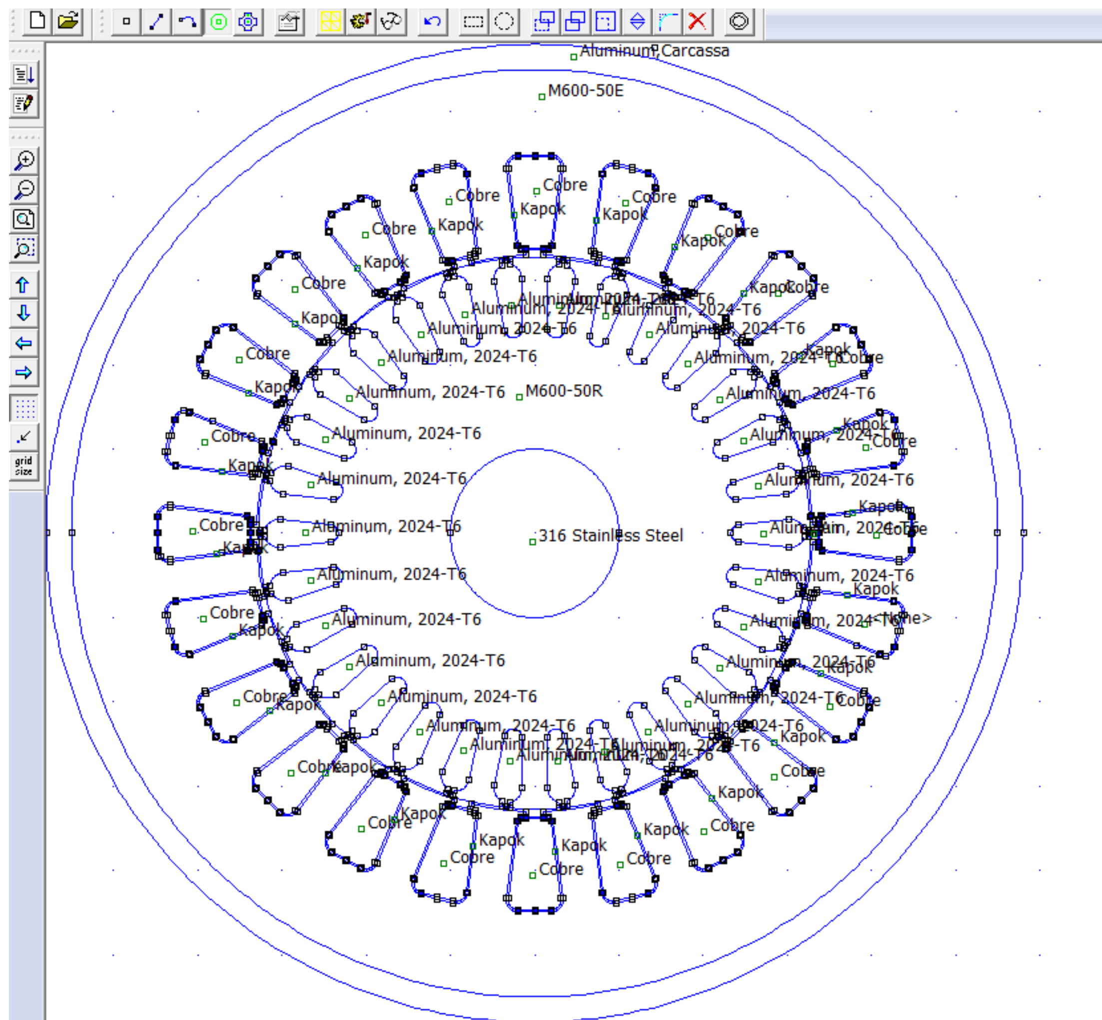


Figura 36. *Motor con los materiales asignados*

3.3. Análisis térmico

3.3.1. Ventilación natural

Las temperaturas y los parámetros de convección para las condiciones de contorno son:

- Carcasa:

$$h = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{carcasa}}} = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{60}{0,116}} = 6,295\ [W/m^2K] \quad (16)$$

$$T = 40ºC$$

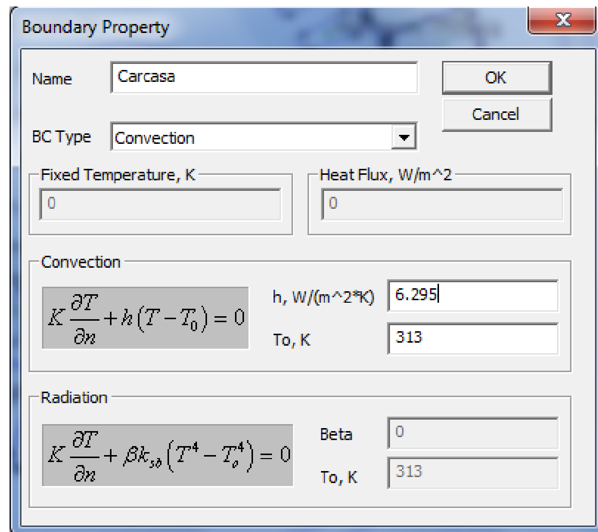


Figura 37. *Condiciones de contorno en la carcasa*

- Entrehierro:

$$h = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{rotor}}} = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{90}{0{,}066}} = 8{,}021\ [W/m^2K] \qquad (17)$$

$$T = 60ºC$$

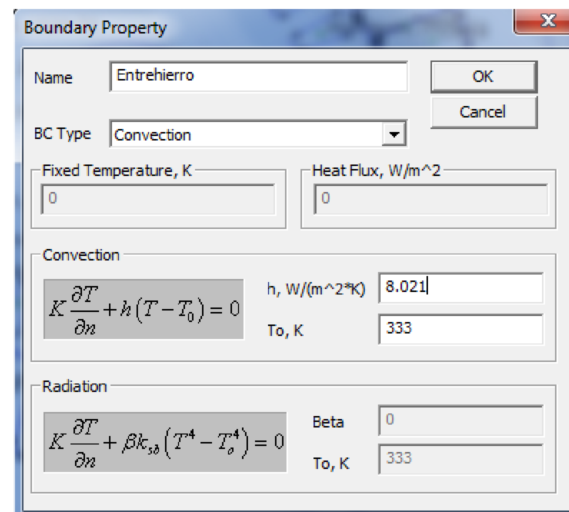


Figura 38. *Condiciones de contorno en el entrehierro*

La respuesta de FEMM es la siguiente (temperatura en Kelvins):

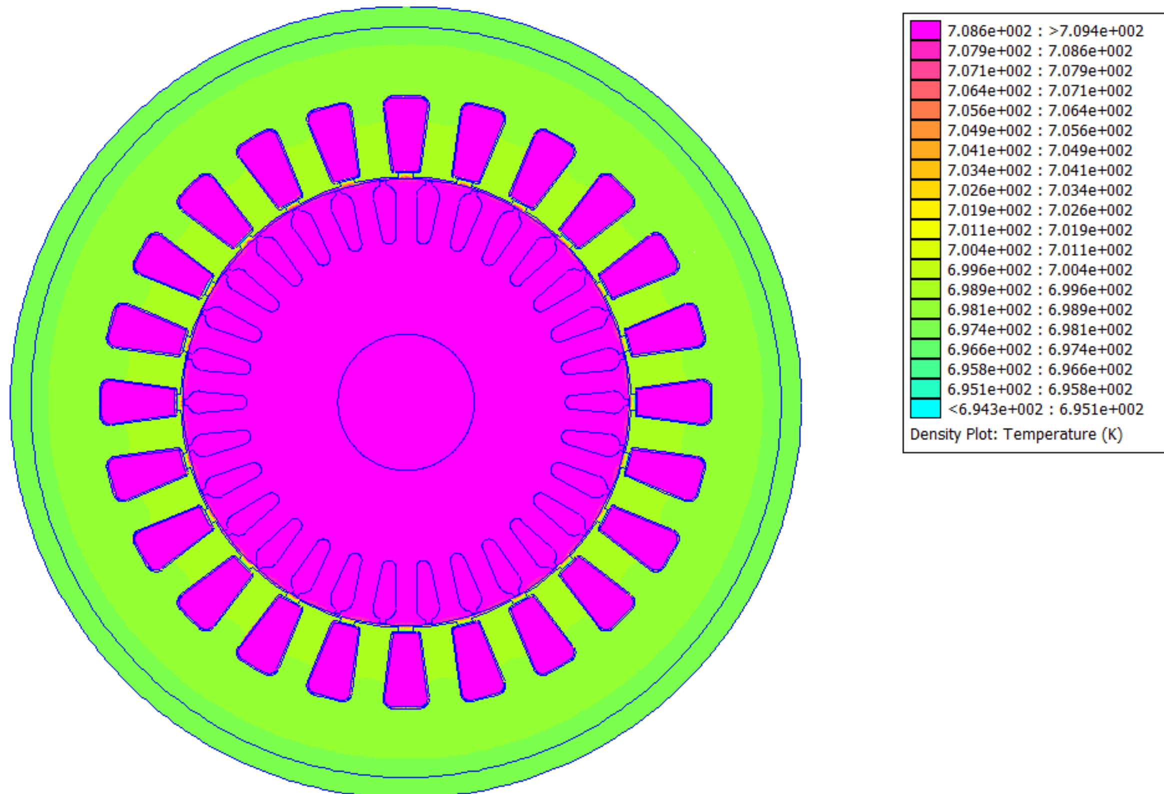


Figura 39. *Distribución de temperaturas con ventilación natural*

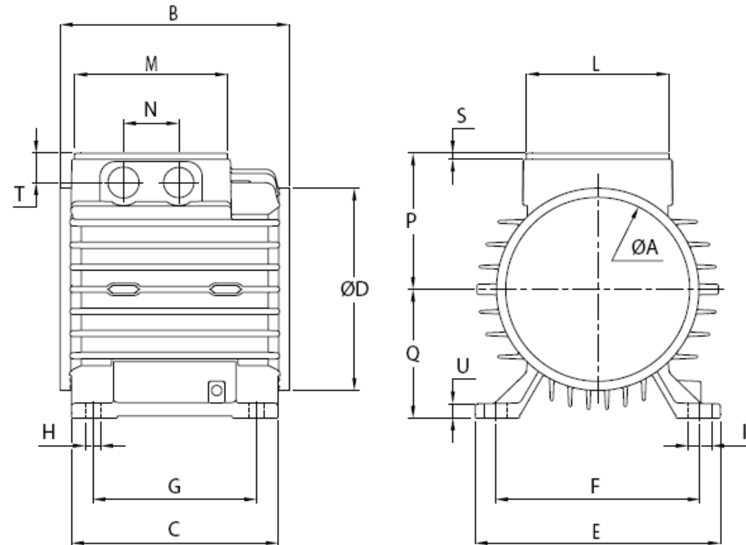
Las temperaturas máximas más relevantes son las siguientes:

- Carcasa: 425°C
- Rotor: 435°C
- Devanados principales: 436°C
- Entrehierro: 432°C

La temperatura del motor con ventilación natural es demasiado elevada y ningún aislante puede soportarla. Por lo tanto se prevé que necesitara una carcasa con aletas.

3.3.2. Ventilación natural con carcasa y aletas

Es necesario escoger una carcasa con aletas que se adapte al motor. En este caso se ha seleccionado el modelo de carcasa MEC 71 B3 del fabricante *Came*:



MODELLO	ØA	B	C	ØD	E	F	G	H	I	L	M	N	P	Q	S	T	U
MEC 63 B3	90	112	101	99	120	100	80	7,5	11,5	70	75	27	66,5	63	3	14	7
MEC 71 B3	110	124	112	118	135	112	90	7,5	12	70	75	27	75	71	3	15	8
MEC 80 B3	125	138	125	134	153	125	100	9	13	83	83	31	83	80	3	18	10

Figura 40. *Carcasa MEC 71 B3*

Es necesario dibujar la carcasa para el motor en CAD y volver a importar a FEMM en *.dxf* como se ha hecho en casos anteriores.

Los coeficientes de convección en este caso son:

- Estator:

$$h = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{carcasa}}} = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{60}{0,142}} = 5,985\ [W/m^2K] \qquad (18)$$

- Entrehierro:

$$h = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{rotor}}} = 1.32 \cdot \sqrt[4]{\frac{90}{0,066}} = 8,021\ [W/m^2K] \qquad (19)$$

La distribución de temperaturas del motor con ventilación natural y carcasa con aletas es:

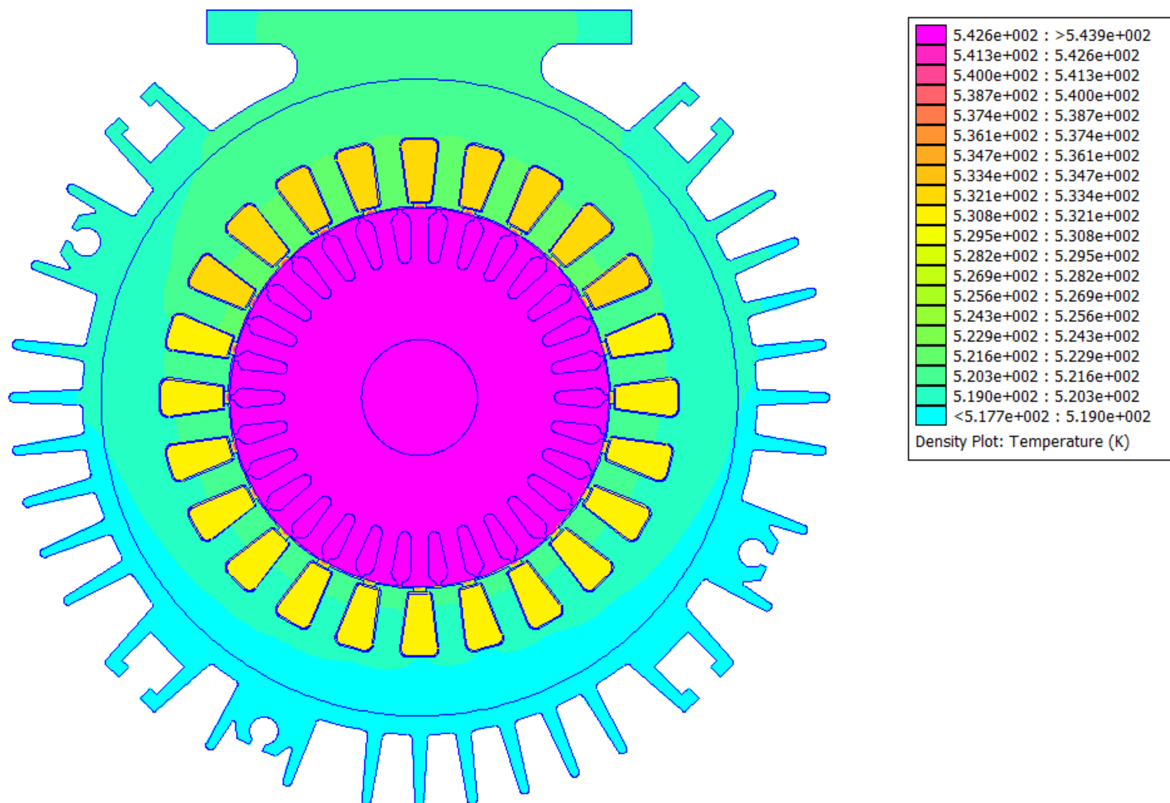


Figura 41. *Distribución de temperaturas con ventilación natural con carcasa y aletas*

Las temperaturas máximas más relevantes son las siguientes:

- Carcasa: 247°C
- Rotor: 270°C
- Devanados principales: 258°C
- Entrehierro: 265°C

Se puede apreciar que gracias a la carcasa con aletas la temperatura es bastante inferior, ya que las aletas permiten una mejor evacuación del calor.

Las temperaturas siguen siendo muy elevadas y será necesario refrigerar el motor mediante ventilación forzada (ventilador acoplado al eje)

3.3.3. Ventilación forzada con carcasa y aletas

En este caso se acopla al eje un ventilador, el cual se estima que podrá forzar el movimiento del aire a velocidades de entre 5 y 15 m/s.

El coeficiente de convección para ventilación forzada es el siguiente:

- Estator

$$h = 3{,}89 \cdot \sqrt{\frac{v}{L_{carcasa}}} = 3{,}89 \cdot \sqrt{\frac{14}{0{,}124}} = 41{,}334\ [W/m^2K] \quad (20)$$

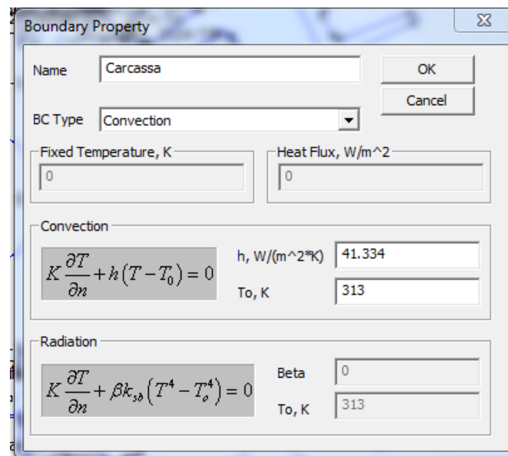


Figura 42. *Condiciones de contorno en la carcasa con ventilación forzada a 14m/s*

- Entrehierro

$$h = 3{,}89 \cdot \sqrt{\frac{v}{L_{rotor}}} = 3{,}89 \cdot \sqrt{\frac{14}{0{,}061}} = 58{,}932 \quad [W/m^2K] \quad (21)$$

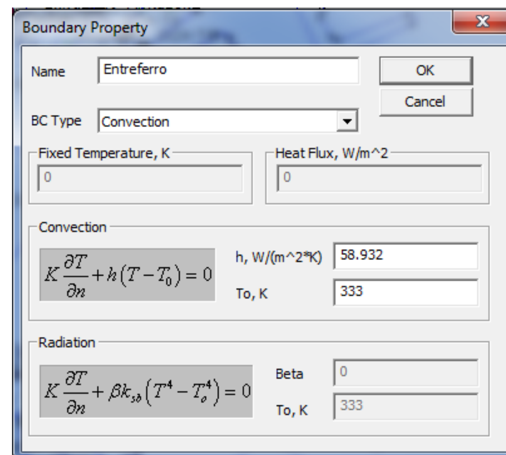


Figura 43. *Condiciones de contorno en la carcasa con ventilación forzada a 14m/s*

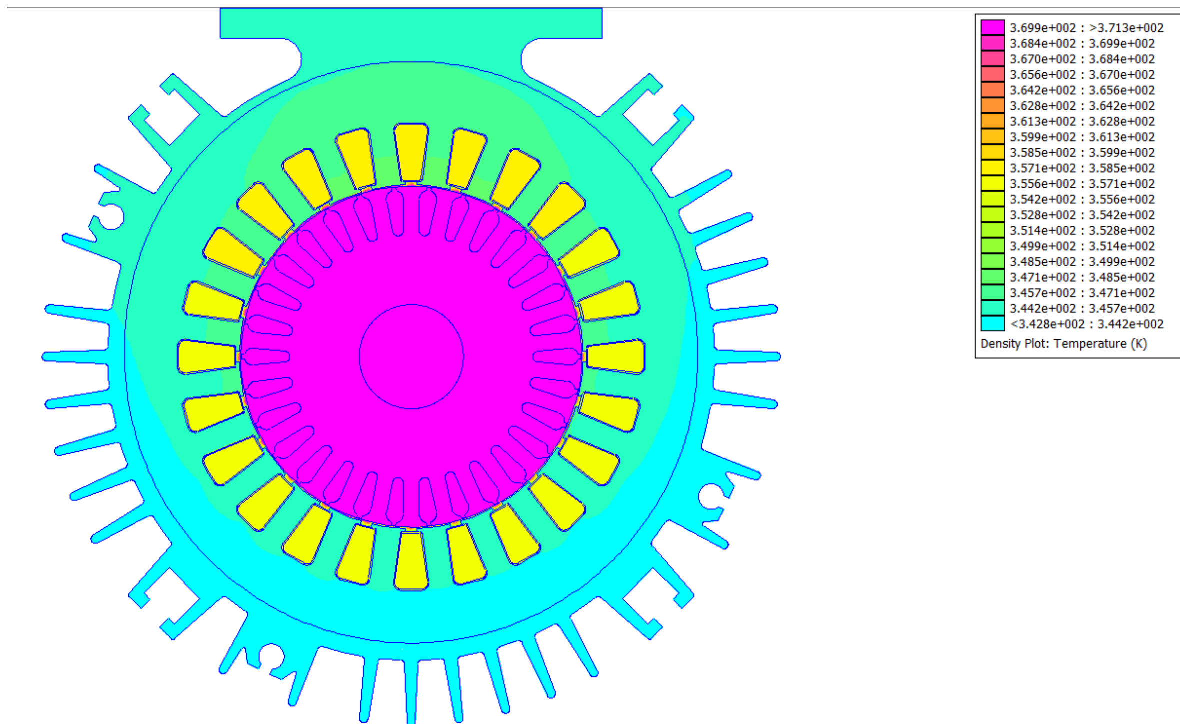


Figura 44. *Distribución de temperaturas con ventilación forzada a 14 m/s*

Las temperaturas máximas más relevantes son las siguientes:

- Carcasa: 72°C
- Rotor: 98°C
- Devanados principales: 83°C
- Entrehierro: 92°C

Estas temperaturas se encuentran dentro de los límites y por lo tanto existen aislantes para poder soportarlas. En este motor se escogería un aislante de la clase F:

Tabla 1. *Clases de aislamientos*

Classe	T. amb [°C]	ΔT [°C]	Tmax [°C]
B	40	80	130
F	40	105	155
H	40	125	180




Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Anexo 2
Resumen resultados

DISEÑO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

TFG presentado para optar al título de GRADO en INGENIERÍA ELÉCTRICA
por **Andrés Alonso Martín**

Barcelona, 11 de Junio de 2014

Director: Ramón Bargalló Perpiñà
Departamento de Ingeniería Eléctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE

TABLA RESUMEN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO 0,37kW		
Características nominales		
	Valor	Unidades
Pn	369	W
Vn	1450	r.p.m
Tn	2,43	Nm
Tarranque	8,82	Nm
Polos	4	
V	230	V
In	4	A
Io	1,906	A
Rendimiento	68,3	%
C de arranque	70	µF
PF	0,59	

Estator		
	Valor	Unidades
Chapa	SA110D (Euro Tranciatura)	
Ranuras	24	
Diámetro ext.	110	mm
Diámetro int.	66	mm
Área ranura	62,85	mm2
Grosor Chapa	0,5	mm
Longitud	61	mm
Material	M600-50	
Entrehierro	0,25	mm

Devanado principal		
Nº vueltas	492	
Nº conductores por ranura	62	
Diámetro conductor	0,71	mm
Sección conductor	0,396	mm2
Densidad de corriente	10	A/mm2
Factor de ocupación	0,391	

Devanado de arranque		
Nº vueltas	185	
Nº conductores por ranura	185	
Diámetro conductor	0,4	mm
Sección conductor	0,126	mm2
Densidad de corriente	41,69	A/mm2
Factor de ocupación	0,37	

Rotor		
	Valor	Unidades
Chapa	RA066D CPK	
Ranuras	36	
Diámetro ext.	65,5	mm
Diámetro int.	20	mm
Área ranura	22,7	mm
Grosor Chapa	0,5	mm
Longitud	61	mm
Material	M600-50	

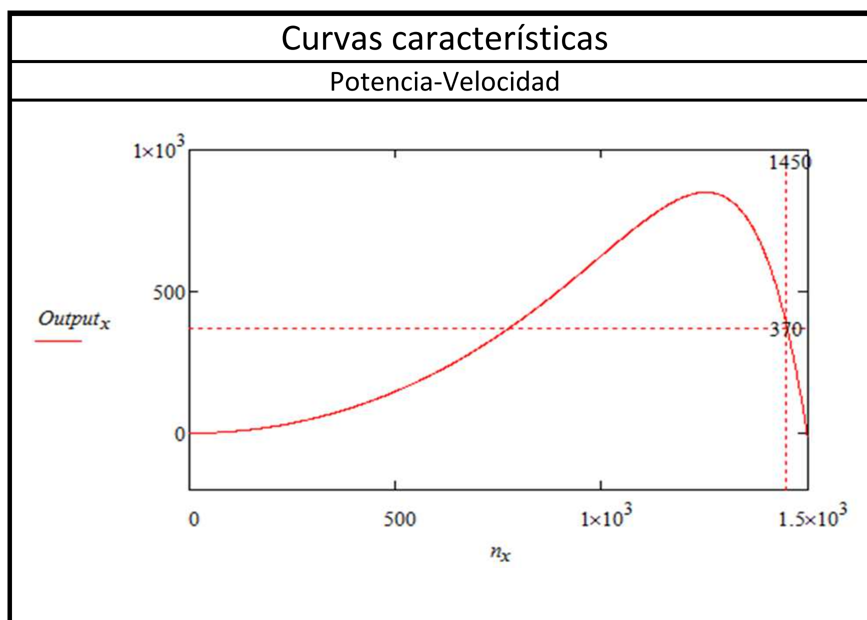
Inducciones		
	Valor	Unidades
Dientes Estator	1,80	T
Dientes Rotor	1,70	T
Corona Estator	1,46	T
Corona Rotor	1,00	T
Entrehierro	1,00	T

Pérdidas		
	Valor	Unidades
P estator	5,48	W
P rotor	2,93	W
P cobre	79,46	W
P aluminio	56,26	W

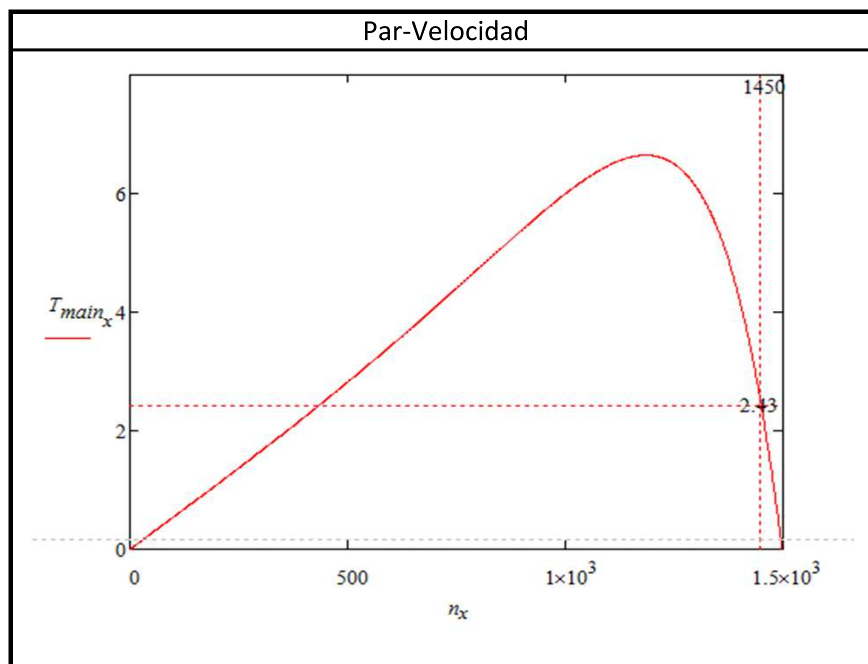
Ventilación forzada con aletas		
T. Carcasa	72	°C
T. Rotor	98	°C
T. Devanados	83	°C
T. Entrehierro	92	°C

Curvas características

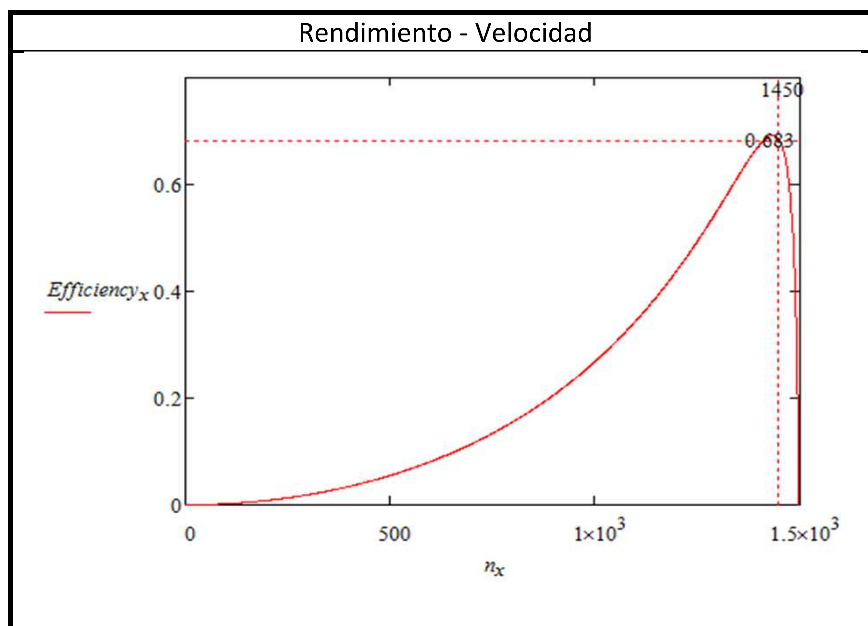
Potencia-Velocidad



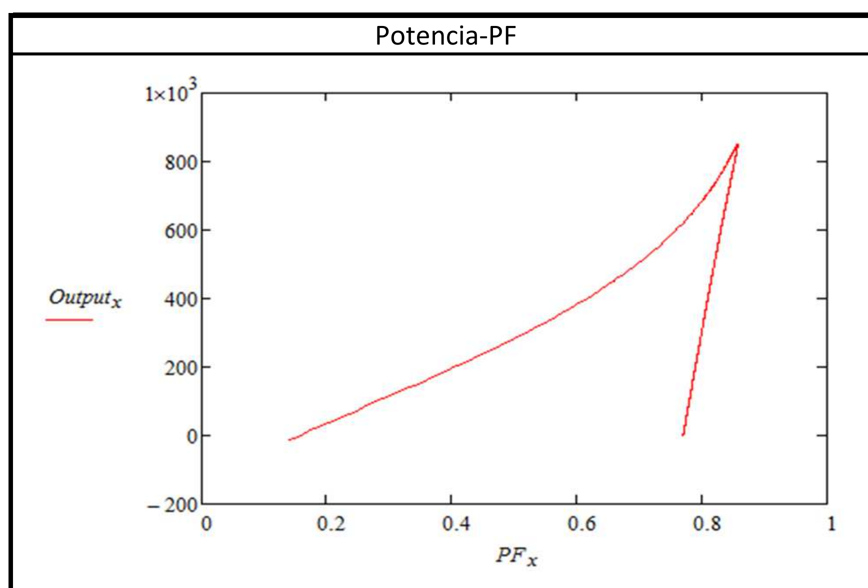
Par-Velocidad



Rendimiento - Velocidad



Potencia-PF







Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Anexo 3
Presupuesto

DISEÑO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

TFG presentado para optar al título de GRADO en INGENIERÍA ELÉCTRICA
por **Andrés Alonso Martín**

Barcelona, 11 de Junio de 2014

Director: Ramón Bargalló Perpiñà
Departamento de Ingeniería Eléctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE

El presupuesto para este proyecto se divide en dos partes: presupuesto de los materiales y presupuesto de diseño y montaje.

Tabla 1. *Presupuesto de los materiales*

	Cantidad (Kg)	Precio/Kg (€/Kg)	Precio total (€)
Acero M600	3,30	10	33,03
Aluminio	0,60	8	4,81
Cobre	0,10	7,1	0,72
Acero inoxidable	0,15	11	1,68
Materiales de montaje (cojinetes, tornillería, etc.)			30
TOTAL			70,24

Tabla 2. *Presupuesto de diseño y montaje*

	Tiempo (h)	Precio/hora (€/h)	Precio total (€)
Diseño	300	30	9.000
Montaje	8	20	160
TOTAL			9.160

Tabla 3. *Presupuesto final*

	Precio (€)
Material	70,24
Diseño y montaje	9.160
IVA (21%)	1.938,35
TOTAL	**11.168,59**




Anexo 4
Chapas y carcasa

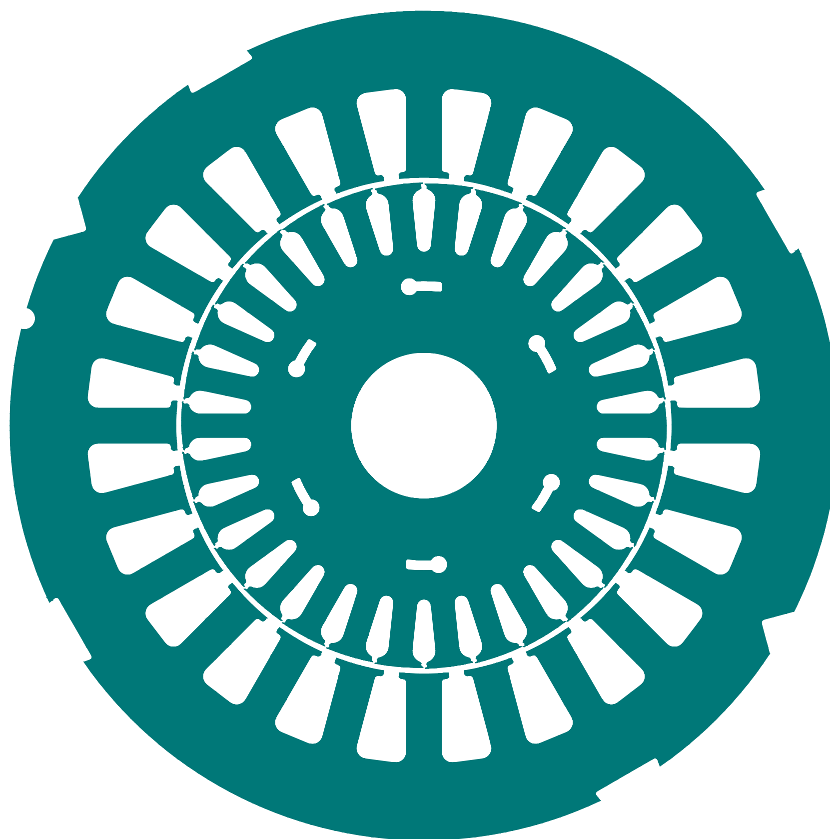
DISEÑO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

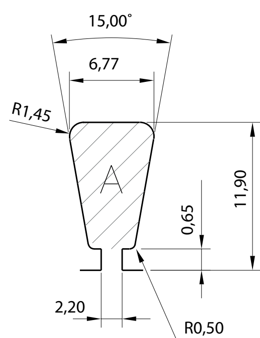
TFG presentado para optar al título de GRADO en INGENIERÍA ELÉCTRICA
por **Andrés Alonso Martín**

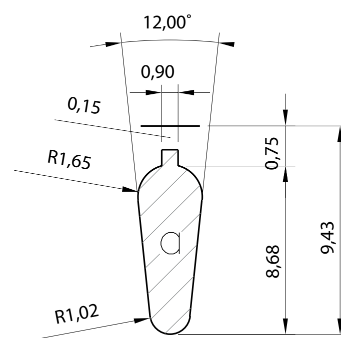
Barcelona, 11 de Junio de 2014

Director: Ramón Bargalló Perpiñà
Departamento de Ingeniería Eléctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE







EU 2552A

Lamierini tranciati - Macchine asincrone

SA110D

DE mm	DI mm	N	A mmq	LD mm	LC mm	LS mm	AC mm
110,00	66,00	24	62,85	4,60	10,10	0,00	2,20

#	RI	GR	SA	MT	PT	RF	V	$P_{1\,mm}$ g
4		✓				✓	✓	34,78
5		✓				✓		34,95

RA066D CPK

de mm	n	a mmq	ld mm	ac mm
66,00	30	22,70	3,10	0,90

#	di mm	pz	c	l	fv	ri	$P_{1\,mm}$ g
1	20						18,93
2	22						18,18
3	17						19,38



LEGENDA STATORE - sezione A	
DE	Diametro esterno
DI	Diametro interno
N	Numero cave
A	Area cava
LD	Larghezza dente
LC	Larghezza corona
LS	Larghezza sfaccettatura
AC	Apertura cava
RI	Fori per rivetti
GR	Cave per graffe
SA	Cava per saldatura
MT	Foro per messa a terra
PT	Fori per passaggio tiranti
RF	Riferimento
V	Tacche a V
$P_{1\ mm}$	Peso indicativo g per 1 mm/sp.

LEGENDA ROTORE - sezione A	
de	Diametro esterno
di	Diametro interno
n	Numero cave
a	Area cava
ld	Larghezza dente
ac	Apertura cava
pz	Pozzetto
c	Scanalatura per chiavetta
l	Foro lobato
fv	Fori di ventilazione
ri	Fori per rivetti
$P_{1\ mm}$	Peso indicativo g per 1 mm/sp.

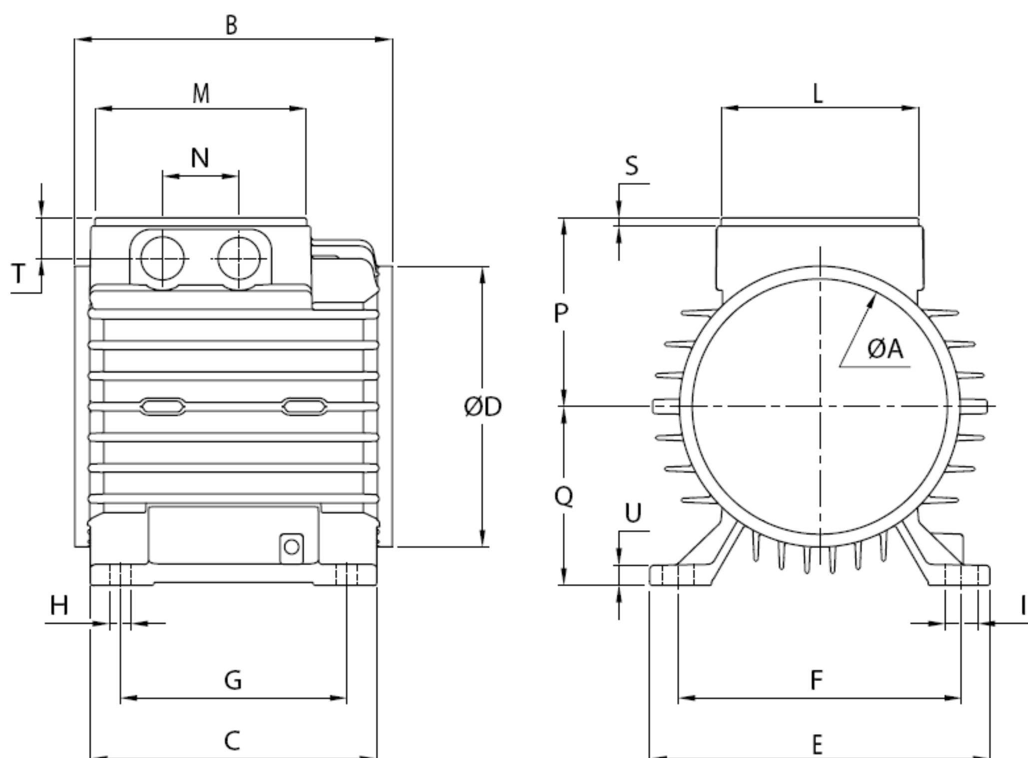
NOTE

I

CARCASSE SERIE TIRANTI

MEC 63-71-80 B3





MODELLO	ØA	B	C	ØD	E	F	G	H	I	L	M	N	P	Q	S	T	U
MEC 63 B3	90	112	101	99	120	100	80	7,5	11,5	70	75	27	66,5	63	3	14	7
MEC 71 B3	110	124	112	118	135	112	90	7,5	12	70	75	27	75	71	3	15	8
MEC 80 B3	125	138	125	134	153	125	100	9	13	83	83	31	83	80	3	18	10

Uscite cavi disponibili MEC63: 3/8"G-PG7-PG9-PG11-PG13,5-M12-M16-M20
Uscite cavi disponibili MEC71: 3/8"G-PG7-PG11-PG13,5-PG16-M12-M16-M20
Uscite cavi disponibili MEC80: 3/8"G-PG7-PG11-PG13,5-PG16-M12-M16-M20